

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

С.П. Денисюк, Д.Г. Дерев'янюк

ПРОМИСЛОВА ЕЛЕКТРОНІКА
Моделювання пристроїв силової електроніки в MATLAB
Simulink

ПРАКТИКУМ

*Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
як навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавра за освітньою програмою
«Інжиніринг автоматизованих електротехнічних комплексів»*

Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2019

Рецензент *Данілін О.В.*, канд. техн. наук, доц. кафедри автоматизації
управління електротехнічними комплексами
Відповідальний
редактор *Замулко А.І.*, канд. техн. наук, доц. кафедри електропостачання

*Гриф надано Методичною радою КПП ім. Ігоря Сікорського (протокол № 8 від 25.04.2019 р.)
за поданням Вченої ради ІЕЕ (протокол № __ від __.__.2019 р.)*

Електронне мережне навчальне видання

Денисюк Сергій Петрович, докт. техн. наук, проф.
Дерев'янка Денис Григорович, канд. техн. наук, ст. викл.

Моделювання пристроїв силовій електроніки в MATLAB Simulink

ПРАКТИКУМ

Промислова електроніка: Моделювання пристроїв силовій електроніки в MATLAB Simulink. [Електронний ресурс]: навч. посіб. для здобувачів ступеня бакалавра за освітньою програмою «системи електропостачання» / С.П. Денисюк, Д.Г. Дерев'янка КПП ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 2,9 Мбайт). – Київ : КПП ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 95 с.

У представленому посібнику викладено основні положення щодо виконання комп'ютерних практикумів, тематика яких обіймає розділи курсу по вивченню лінійних і нелінійних динамічних систем з пристроями силовій електроніки. Навчальне видання до виконання комп'ютерних практикумів містить основні теоретичні відомості, програму роботи, вказівки для її виконання, зміст звіту та контрольні запитання.

Розглянуто існуючі методи моделювання лінійних і нелінійних динамічних систем, котрі базуються на принципах візуально-орієнтованого програмування з використанням моделей у вигляді комбінацій компонентів-блоків, шляхом з'єднання яких між собою складаються функціональні моделі пристроїв і систем.

Навчальне видання призначене для здобувачів ступеня магістра за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», освітньою програмою «Системи електропостачання».

© С.П. Денисюк, Д.Г. Дерев'янка, 2019
© КПП ім. Ігоря Сікорського, 2019

ЗМІСТ

Вступ.....	5
ТЕМА 1: ІМПУЛЬСНІ ПРИСТРОЇ	8
КОМП'ЮТЕРНИЙ ПРАКТИКУМ № 1 «ПОБУДОВА SPS-МОДЕЛЕЙ»..	8
Завдання 1.1 Виконати модель резистивного дільника постійної напруги і виміряти його вхідну і вихідну напруги.	9
Завдання 1.2 Провести моделювання перехідного процесу в інтегрованому RL-ланцюзі з вимірюванням його струму і напруги на виході (на резисторі).	11
Завдання 1.3 Провести моделювання переривчастого режиму роботи RL-ланцюга при живленні змінною напругою.	13
Завдання 1.4 Провести моделювання інтегратора з RC-ланцюга при дії імпульсної напруги прямокутної форми, що має постійну складову.	17
Контрольні питання та завдання	20
ТЕМА 2: ВИПРЯМЛЯЧІ	21
КОМП'ЮТЕРНИЙ ПРАКТИКУМ № 2 «ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ ВИПРЯМЛЯЧІВ»	21
Основні теоретичні відомості	21
Завдання 2.1 Побудова моделі однофазного випрямляча з RL – навантаженням.	24
Завдання 2.2 Побудова моделі однофазного тиристорного випрямляча з RL – навантаженням	27
Завдання 2.3 Побудова моделі трифазного випрямляча з R – навантаженням	31
Завдання 2.4 Побудова моделі двонапівперіодного випрямляча з нульовою точкою трансформатора і ємнісним фільтром	36
Контрольні питання та завдання	39
ТЕМА 3: АВТОНОМНІ ІНВЕРТОРИ.....	40
КОМП'ЮТЕРНИЙ ПРАКТИКУМ № 3 «ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ АВТОНОМНИХ ІНВЕРТОРІВ».....	40
Основні теоретичні відомості	40
Завдання 3.1 Побудова моделі напівмостового інвертора струму з RL – навантаженням	45

Завдання 3.2 Побудова моделі мостового інвертора струму з RL – навантаженням	48
Контрольні питання та завдання	51
КОМП'ЮТЕРНИЙ ПРАКТИКУМ № 4 «ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК АВТОНОМНОГО ІНВЕРТОРА НАПРУГИ»	52
Основні теоретичні відомості	52
Завдання 4.1 Квазіусталені характеристики.....	57
Завдання 4.2. Статичні характеристики трифазного інвертора.....	63
Контрольні питання та завдання	66
КОМП'ЮТЕРНИЙ ПРАКТИКУМ № 5 «ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК АВТОНОМНОГО ІНВЕРТОРА НАПРУГИ, РОЗРАХУНОК ТА ПОБУДОВА ЗОВНІШНЬОЇ (НАВАНТАЖУВАЛЬНОЇ), ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ТА ЕНЕРГЕТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ІНВЕРТОРА»	67
Завдання 5.1 Розрахунок та побудова зовнішньої (навантажувальної), електромагнітних та енергетичних характеристик інвертора	67
Завдання 5.2 Динамічні характеристики трифазного інвертора	72
Контрольні питання та завдання.....	75
ТЕМА 4: РЕГУЛЯТОРИ ПОСТІЙНОЇ НАПРУГИ	76
КОМП'ЮТЕРНИЙ ПРАКТИКУМ № 6 «ДОСЛІДЖЕННЯ ІМПУЛЬСНОГО ПОНИЖУЮЧОГО РЕГУЛЯТОРА ПОСТІЙНОЇ НАПРУГИ»	76
Основні теоретичні відомості	76
Завдання 6.1 Віртуальна лабораторна установка та її характеристики	78
Контрольні питання та завдання	84
ТЕМА 5: КОМПЕНСАТОРИ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ	85
КОМП'ЮТЕРНИЙ ПРАКТИКУМ № 7 «ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ СТАТИЧНОГО КОМПЕНСАТОРА РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ STATIC VAR COMPENSATOR».....	85
Основні теоретичні відомості	85
Завдання 7.1 Вихідні дані для моделювання (див. табл. 7.1):	88
Контрольні питання та завдання	95

ВСТУП

Система MATLAB є мовою програмування високого рівня, призначена для інженерних і наукових обчислень та створення засобів моделювання різних пристроїв і систем. Вона базується на алгоритмах матричних обчислень з виконанням операцій над групами векторів, що є основною відмінністю цієї системи від інших відомих пакетів – Mathcad, Maple, Mathematika та інших. За рахунок матричного та векторного представлення даних розробникам вдалося суттєво підвищити швидкість обчислень, ефективно використати ресурси пам'яті і забезпечити високу точність розрахунків.

У MATLAB реалізовано модульний принцип побудови з широкими можливостями модифікації та розширення, що підтверджує склад цього продукту, а саме: декілька десятків пакетів прикладних програм і більше двох сотень додатків та розширень, найбагатша бібліотека функцій (понад 800), а також величезний обсяг документації, що нараховує десятки тисяч сторінок.

Для зручності користування вся система MATLAB поділена на розділи, оформлені у вигляді пакетів програм, найбільш загальні з яких утворили ядро. Інші пакети об'єднані або існують індивідуально у вигляді так званих Toolboxes.

Серед інших слід виділити пакет Simulink, призначений для моделювання лінійних і нелінійних динамічних систем. Він базується на принципах візуально-орієнтованого програмування з використанням моделей у вигляді комбінацій компонентів-блоків, шляхом з'єднання яких між собою складаються функціональні моделі пристроїв і систем. Під час цього математична модель, що описує поведінку такої системи, формується і вирішується автоматично. Для дослідника Simulink створює масу можливостей, починаючи від функціонального представлення пристрою й аж до генерування кодів, що використовуються для програмування мікропроцесорів.

Пакет Simulink разом з пакетом розширення Simpowersystems (у більш ранніх версіях – Power Systems Blockset) є основою для вивчення та дослідження пристроїв силової електроніки і електромеханічних пристроїв.

Simulink є досить самостійним інструментом MATLAB, і під час роботи з ним, зовсім не потрібно знати сам MATLAB та інші його додатки. З іншого боку, доступ до функцій MATLAB та інших його інструментів залишається відкритим, їх можна використовувати в Simulink. Частина пакетів, що входять до складу MATLAB, має інструменти, які вбудовуються в Simulink (наприклад, Lti-viewer додатка Control System Toolbox – пакета для розробки систем керування).

Під час роботи з Simulink користувач має можливість модернізувати бібліотечні блоки, створити свої власні, а також створити нові бібліотеки блоків.

В разі моделювання, користувач може вибирати метод розв'язання диференціальних рівнянь, а також спосіб зміни модельного часу (з фіксованим або змінним кроком). У ході моделювання є можливість стежити за процесами, що відбуваються в системі. Для цього використовуються спеціальні пристрої спостереження, що входять до складу бібліотеки Simulink. Результати моделювання можуть бути представлені у вигляді графіків або таблиць.

Перевага Simulink полягає також у тому, що він дає змогу поповнювати бібліотеки блоків за допомогою підпрограм, написаних як мовою MATLAB, так і мовами C ++, Fortran і Ada.

Бібліотека Simulink містить блоки, в основному орієнтовані на моделювання конкретних пристроїв у вигляді функціональних схем. До неї входять джерела масштабуючи сигналів, лінійні й нелінійні блоки, квантувачі, інтегратори, диференціатори, вимірювачі й т.п. До бібліотеки Simpowersystems входить набір блоків для імітаційного моделювання електротехнічних пристроїв у вигляді пасивних і активних електротехнічних елементів, джерел енергії, електродвигунів, трансформаторів, напівпровідникових елементів. За допомогою Simulink і Simpowersystems можна імітувати роботу пристроїв у тимчасовій сфері, а також виконувати аналіз їх властивостей – розраховувати опір ланцюга, одержувати амплітудно- та фазочастотні характеристики, виконувати гармонічний аналіз струмів і напруг.

Безсумнівна перевага Simulink і Simpowersystems полягає в можливості побудови моделей складних електротехнічних систем на основі методів імітаційного й функціонального моделювання. Так, для побудови силовій частини напівпровідникового перетворювача використовуються блоки Simpowersystems, що імітують елементи та пристрої, а в його системі керування – функціональні блоки Simulink. Вони відбивають алгоритм її роботи без представлення електричної схеми. За рахунок такого підходу, на відміну від відомих пакетів схемотехнічного моделювання типу Orcad, Pspice, Designlab, Workbench та ін., модель спрощується, зберігається пам'ять, підвищується швидкість розрахунків і працездатність ПК. Важливо відзначити, що після побудови функціональної моделі, виключається складний етап складання та розв'язання алгебраїчних і диференціальних рівнянь та забезпечується можливість візуального контролю поведінки процесів створеної моделі, які й протікають у ній.

Під час побудови моделей зі застосуванням елементів Simpowersystems і блоків з бібліотеки Simulink можливе залучення функцій самої системи MATLAB, що суттєво розширює можливості моделювання електротехнічних систем і напівпровідникових пристроїв. Незважаючи на розміри бібліотеки Simpowersystems, можливі випадки, коли потрібний блок, як такий, у бібліотеці відсутній. У цих випадках користувач може розробити свої власні блоки, використовуючи, наявні в бібліотеці елементи і застосовуючи створені підсистеми в Simulink.

Все зазначене вище дає змогу стверджувати, що Simpowersystems і Simulink – це сучасні пакети зі широкими можливостями моделювання пристроїв силовій електроніки, електромеханічних пристроїв і систем автоматичного керування, що постійно розвиваються.

ТЕМА 1: ІМПУЛЬСНІ ПРИСТРОЇ

КОМП'ЮТЕРНИЙ ПРАКТИКУМ № 1 «ПОБУДОВА SPS-МОДЕЛЕЙ»

Мета роботи – познайомитися із принципами та особливостями побудови SPS-моделей та провести моделювання заданих схем.

Методика створення SPS-моделі нічим не відрізняється від методики створення моделі на основі базової бібліотеки Simulink. Так само як і для звичайної Simulink-моделі (S-моделі), необхідно виконати розстановку блоків на схемі, встановити їх параметри, з'єднати блоки і встановити параметри розрахунку моделі в цілому. Для SPS-моделей доступний прискорений режим розрахунку і всі можливості Simulink, включаючи набір інструментів SimulinkToolsPerformance, лінійний аналіз і т. д. Однак SPS-моделі мають і деякі особливості:

1. Входи і виходи SPS-блоків, в відмінну від блоків Simulink, не показують напрямок передачі сигналу, оскільки фактично є еквівалентами електричних контактів. Таким чином, електричний струм може через вхід або вихід блоку протікати в двох напрямках: як всередину блоку, так і назовні.

2. З'єднувальні лінії між блоками є, по суті, моделями електричних проводів, по яких струм може протікати в двох напрямках. У Simulink-моделях ж інформаційний сигнал поширюється тільки в одному напрямку - від виходу одного блоку до іншого входу.

3. Simulink-блоки і SimPowerSystems-блоки не можуть бути безпосередньо з'єднані один з одним. Сигнал від S-блоку можна передати до SPS-блоку через керовані джерела струму або напруги, а навпаки - за допомогою вимірювачів струму або напруги.

4. При розрахунку схеми, що містить нелінійні блоки, слід використовувати методи:

- ode15s - багатокроковий метод змінного порядку (від 1 до 5), що використовує формули чисельного диференціювання;
- ode23t - метод трапецій з інтерполяцією.

Ці методи дають найкращі результати по швидкодії.

5. На схемі повинен бути присутнім хоча б один вимірювальний блок (CurrentMeasurement, VoltageMeasurement, ThreePhase VI Measurement або Multimeter). Це пов'язано з особливостями перетворення SimPowerSystems-моделі в еквівалентну розрахункову Simulink-модель.

Завдання для проведення роботи

Завдання 1.1 Виконати модель резистивного дільника постійної

напруги і виміряти його вхідну і вихідну напруги.

Основні теоретичні відомості

Дільник напруги – пристрій, в якому вхідна і вихідна напруга зв'язані коефіцієнтом передачі. Як дільник напруги зазвичай застосовують регульовальний опір, який являє собою дві ділянки кола, що називають плечима, сума напруги на яких рівна вхідній напрузі. Плече між нульовим потенціалом і середньою точкою називають нижнім, а інше – верхнім. Поділяють лінійні і нелінійні дільники напруги. В лінійних вихідна напруга змінюється по лінійному закону в залежності від вхідної. Такі дільники використовуються для задання потенціалів робочої напруги в різних точках електронних схем. В нелінійних дільниках вихідна напруга залежить від коефіцієнта передачі нелінійно. Опір може бути як активним, так і реактивним.

Застосування дільників напруги:

- Дільники напруги використовуються для регулювання рівня сигналу, для зміщення активних пристроїв в підсилювачах, і для вимірювання напруг. Вимірювальні мости і мультиметри мають у своєму складі дільники напруги.
- Потенціометри, які є змінними дільниками струму, використовуються у різноманітних приладах, зокрема у аудіосистемах та радіоприймачах для регулювання гучності. Дільники напруги також може бути використані у мікроконтролерних схемах для вимірювання опору датчика.
- Дільник напруги можна використовувати для стабілізації вхідної напруги, якщо в якості нижнього плеча дільника використовувати стабілітрон.
- Дільники напруги широко використовується у якості атенюаторів на низьких частотах.

Вихідні дані для моделювання та побудова моделі:

Таблиця 1.1 - Блоки та параметри моделі у середовищі MATLAB/Simulink:

Бібліотека	Блок	Параметри
SimPowerSystems/ElectricalSource	DC VoltageSource	$10 + 0.5 * N \text{ В}$
SimPowerSystems/Elements	Series RLC Branch	$10 + N^2 \text{ Ом}$
SimPowerSystems/Measurements	VoltageMeasurement	–
SimPowerSystems/Elements	Series RLC Branch	$20 + N \text{ Ом}$
Simulink\Sinks	Display	–
Час моделювання		10 с
Вирішувач		ode45

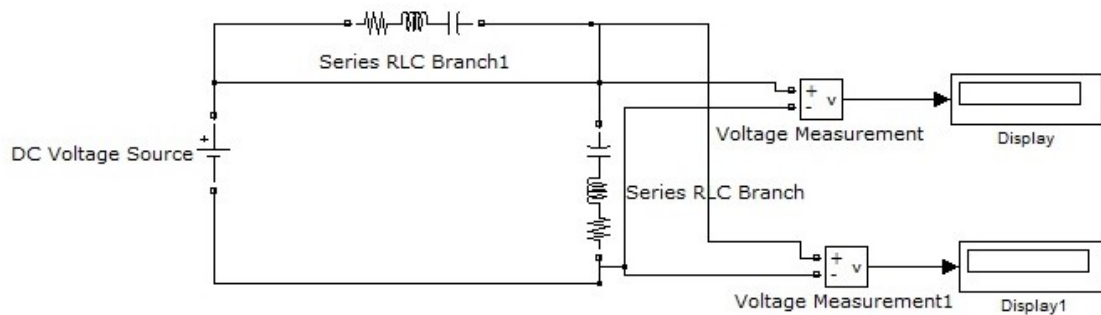


Рисунок 1.1 – Модель резистивного дільника постійної напруги

Наступний етап - налаштування блоків. Почнемо з блоку Series RLC Branch. Встановлюємо значення опору резистора 10 Ом, індуктивності - 0 Гн і ємності конденсатора $-\text{inf}$ (нескінченність), а в текстовому вікні залишаємо рядок None, так як прилад Multimeter не використовується. Аналогічно налаштовуємо блок Series RLC Branch 1, встановивши такі ж значення всіх параметрів.

При вимірюванні постійної напруги блок VoltageMeasurement не вимагає налаштування, а в блоці Display при необхідності збільшення числа значущих цифр у вихідному результаті слід викликати вікно налаштування параметрів і замінити в його випадаючому меню Format короткий формат Short на довгий формат Long. Залишимо формат Short. Після запуску моделі, яка досить проста і з цієї причини немає сенсу замінювати решітець ode45 на більш швидкий, отримуємо результат - напруга на вході дільника 10 В і на виході - 5 В (рис. 1.2).

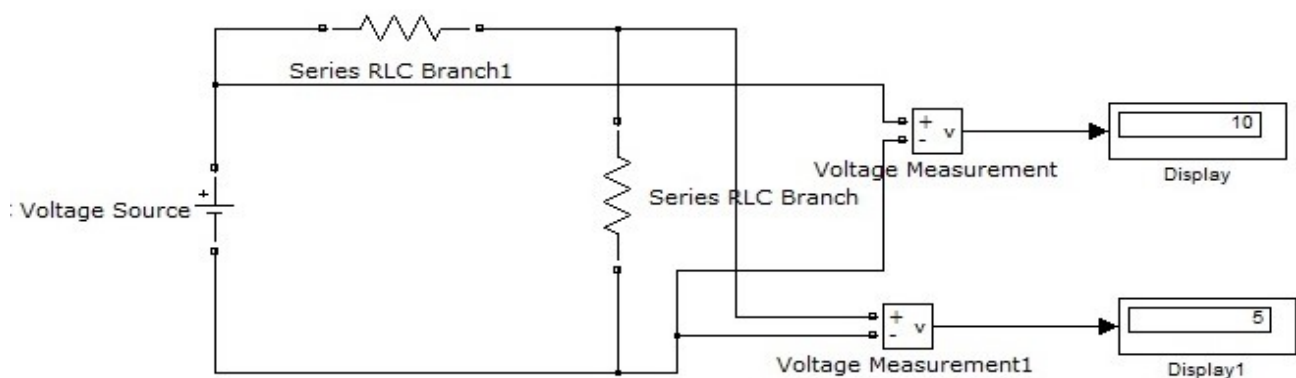


Рисунок 1.2 – Отримані значення напруги на виході.

Завдання 1.2 Провести моделювання перехідного процесу в інтегрованому RL-ланцюзі з вимірюванням його струму і напруги на виході (на резисторі).

Основні теоретичні відомості

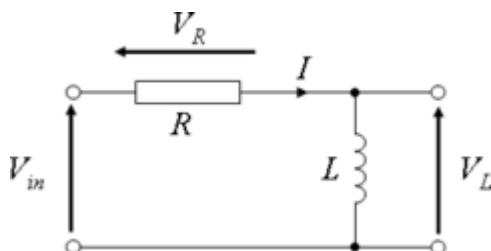


Рисунок 1.3 – схема RL-кола

RL-коло – електричне коло, що складається з резистора та індуктивності. При послідовному включенні – за схемою ділянка напруги – утворює диференціюючу або інтегруючу ланку.

Якщо вхідний сигнал подається на індуктивність, а вихідний знімається з резистора, то таке коло називається колом інтегруючого типу.

Вихідні дані для моделювання та побудова моделі:

Таблиця 1.2 - Блоки та параметри моделі у середовищі MATLAB/Simulink:

Бібліотека	Блок	Параметри
SimPowerSystems/ElectricalSource	DC VoltageSource	50 + 2*N В
SimPowerSystems/Elements	Series RLC Branch	0,5+ 0.1 * NГн
SimPowerSystems/Measurements	CurrentMeasurement	—
SimPowerSystems/Measurements	VoltageMeasurement	—
SimPowerSystems/Elements	Series RLC Branch	4 + N Ом
Simulink\Sinks	Scope	—
Час моделювання		1 с
Вирішувач		ode45

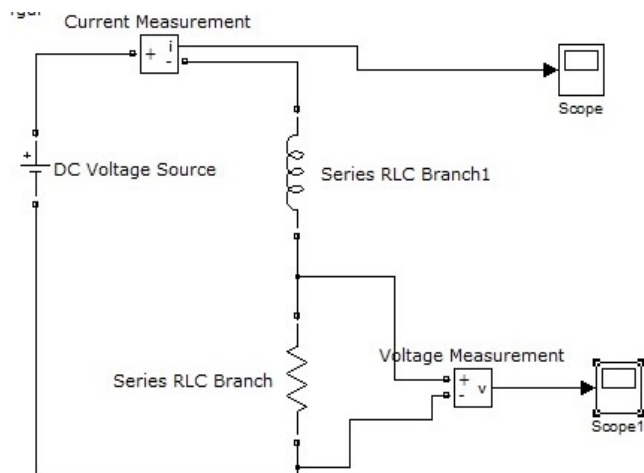


Рисунок 1.4 – Модель досліджуваного RL-ланцюга

Постійна часу RL-ланцюга $T = L / R = 0,125$ с, і тому час моделювання повинен становити більше $0,625$ с (понад $5T$). Вибирається цей час у вікні моделі через меню Simulation/SimulationParameters. Відкривається вікно SimulationParameters і в ньому задається час Stoptime рівним 1 с.

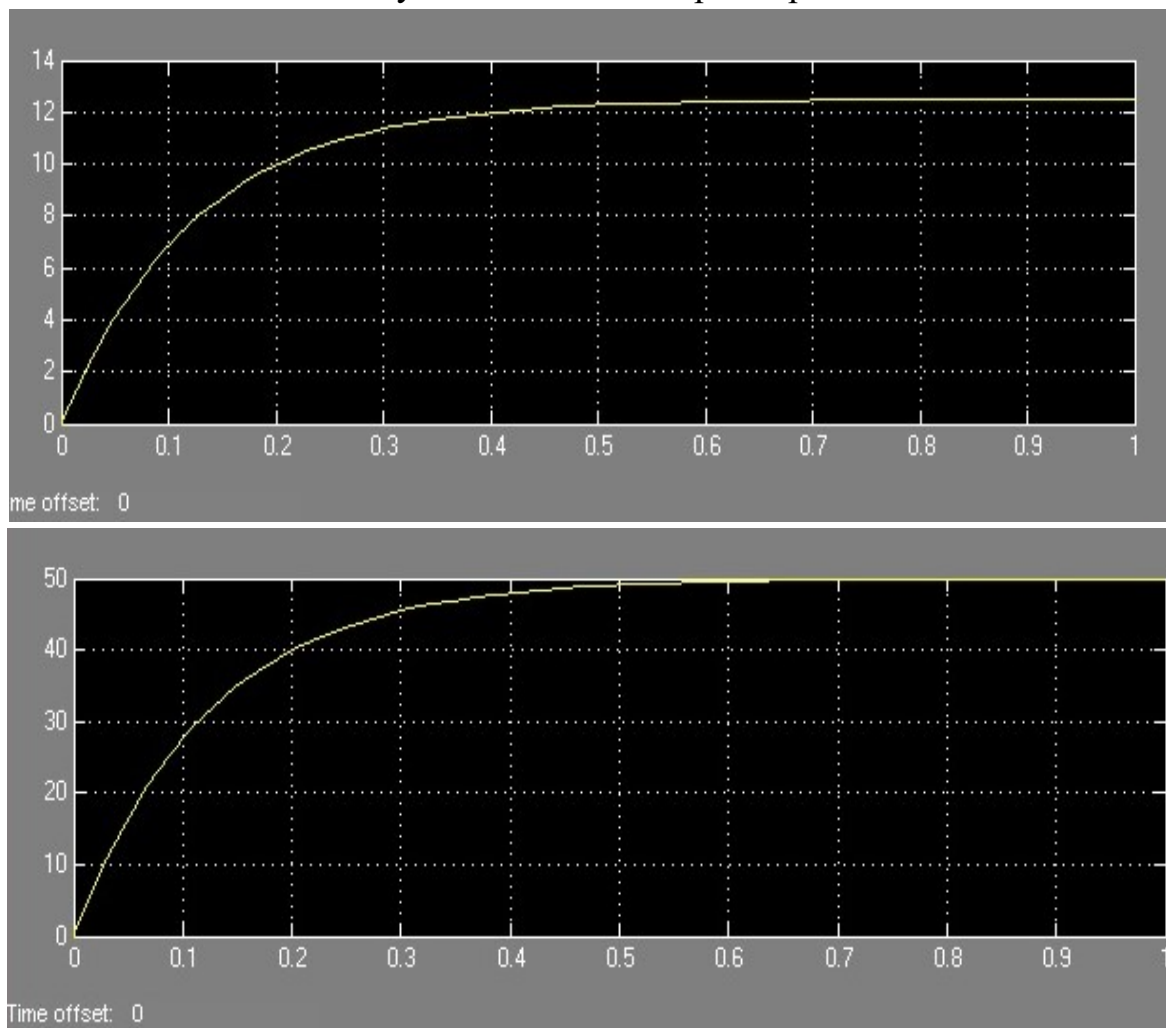


Рисунок 1.5 – Часові діаграми струму і напруги на виході

Завдання 1.3 Провести моделювання переривчастого режиму роботи RL-ланцюга при живленні змінною напругою.

Вихідні дані для моделювання:

- тривалість імпульсів 70%
- фазовий зсув 0,02 с

Таблиця 1.3 - Блоки та параметри моделі у середовищі MATLAB/Simulink:

Бібліотека	Блок	Параметри
SimPowerSystems/ElectricalSource	AC VoltageSource	100 В
SimPowerSystems/Elements	Series RLC Branch	$R = 0,5 \text{ Ом}$ $L = 0,01 \text{ Гн}$
SimPowerSystems/Measurements	CurrentMeasurement	—
Simulink/Sources	PulseGenerator	—
SimPowerSystems/Elements	Breaker	0,15 с
Simulink\Sinks	Scope	—
Час моделювання		10 с
Вирішувач		ode45

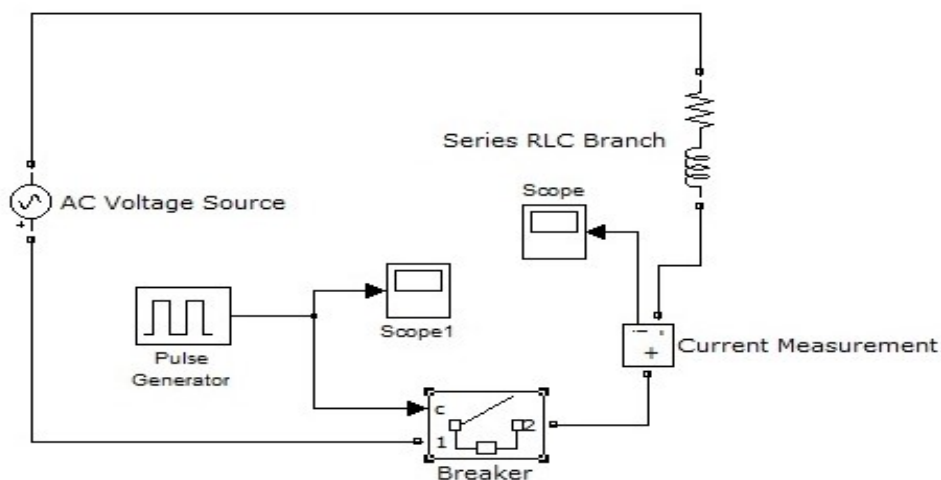


Рисунок 1.6 – Принципова схема моделювання RL-ланцюга

Block Parameters: Breaker

Breaker (mask) (link)

Implements a circuit breaker with internal resistance R_{on} . R_{on} is required by the model and cannot be set to zero.

When the external control mode is selected, a Simulink logical signal is used to control the breaker operation. When the signal becomes greater than zero the breaker closes instantaneously. When it becomes zero, the breaker opens at the next current zero-crossing.

Parameters

Breaker resistance R_{on} (Ohm):

Initial state (0 for 'open' , 1 for 'closed'):

Snubber resistance R_s (Ohms):

Snubber capacitance C_s (F):

☒ External control of switching times

Measurements

OK Cancel Help Apply

Block Parameters: AC Voltage Source

AC Voltage Source (mask) (link)

Ideal sinusoidal AC Voltage source.

Parameters

Peak amplitude (V):

Phase (deg):

Frequency (Hz):

Sample time:

Measurements

OK Cancel Help Apply

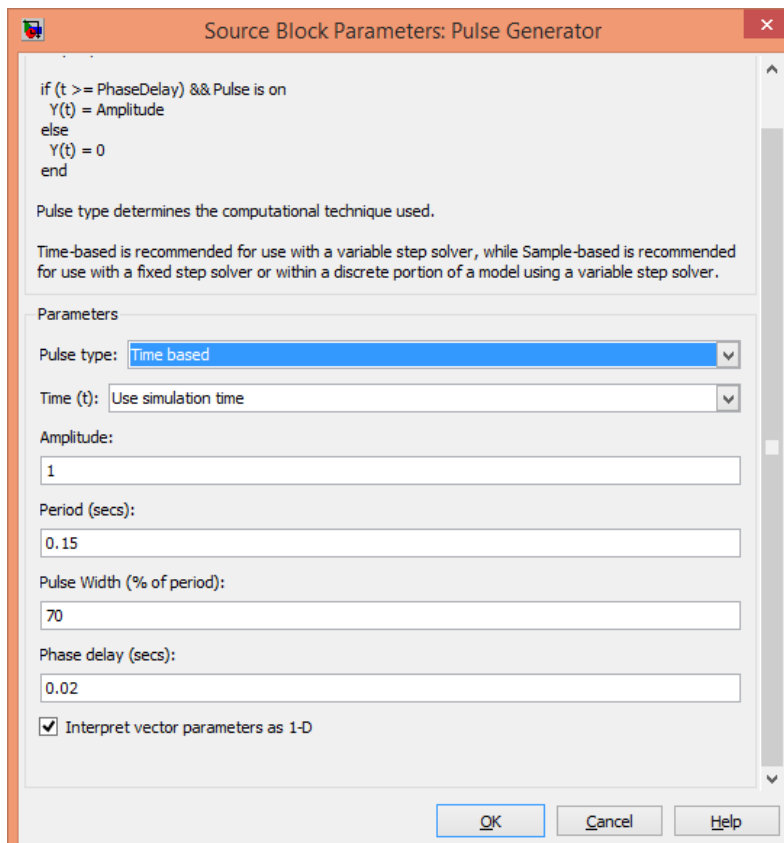
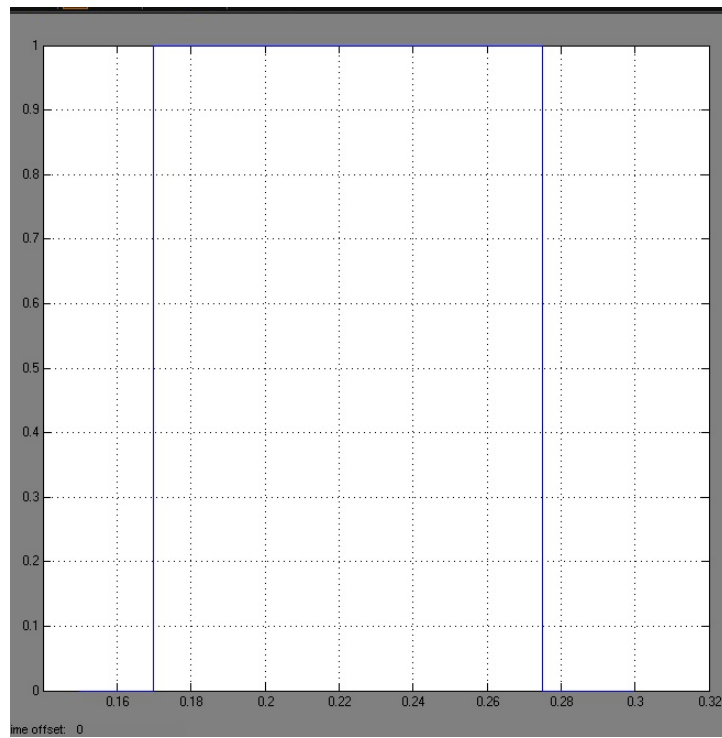
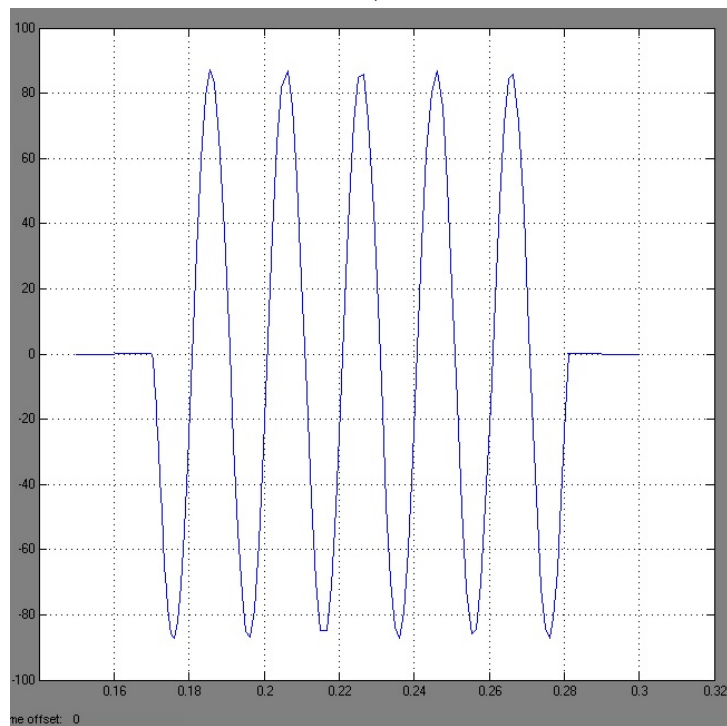


Рисунок 1.7 – Параметри елементів принципової схеми.

У вікні моделі через меню Simulation / SimulationParameters відкриваємо вікно SimulationParameters. Як і рекомендувалося вище, виберемо вирішувач ode15s. Вважаємо, що для спостереження достатньо двох періодів низькочастотної складової сигналу по 0,15 с, тобто Stoptime дорівнює 0,3 с. Високочастотна складова сигналу має період 0,02 с, і для нього слід задати хоча б 10 відліків, вибравши крок дискретизації Maxstepsize рівним 0,002 с. Після запуску моделі отримуємо тимчасові діаграми процесів зміни струму в RL-ланцюзі та сигналу на виході генератора PulseGenerator (рис. 1.8).



a)



б)

Рисунок 1.8 – Часові діаграми процесів зміни струму в RL-ланцюзі (а) та сигналу на виході генератора PulseGenerator (б).

Завдання 1.4 Провести моделювання інтегратора з RC-ланцюга при дії імпульсної напруги прямокутної форми, що має постійну складову.

Основні теоретичні відомості

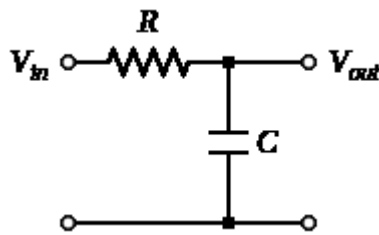


Рисунок 1.9– схема RC-кола інтегруючого типу

Якщо вхідний сигнал подається на резистор, а вихідний знімається з конденсатора (див. рисунок), то таке коло називається колом інтегруючого типу. Назва вказує, що напруга на виході (конденсаторі) є інтегральною функцією струму заряджання конденсатора.

Вихідні дані для моделювання та побудова моделі:

Таблиця 1.4 - Блоки та параметри моделі у середовищі MATLAB/Simulink:

Бібліотека	Блок	Параметри
Simulink/Sources	SignalGenerator	50 В
Simulink/Sources	Constant	15 В
Simulink/MathOperations	Sum	—
SimPowerSystems/ElectricalSources	ControlledVoltageSource	—
SimPowerSystems/Elements	Series RLC Branch	1 Ом
SimPowerSystems/Elements	Parallel RLC Branch	R = 25 Ом C = 0,01 Ф
SimPowerSystems/Measurements	VoltageMeasurement	—
Simulink/SignalRouting	Mux	2
Simulink/Sinks	Scope	—
Час моделювання		0.08 с
Вирішувач		ode45

У моделі використовуються генератори прямокутних імпульсів SignalGenerator і постійної напруги Constant (розділу Sources) і суматор Sum (розділу MathOperations) бібліотеки Simulink, кероване джерело напруги ControlledVoltageSource (розділ ElectricalSources), два блоки Parallel RLC Branch (розділ Elements), вимірювач напруги VoltageMeasurement (розділ Measurements)

бібліотеки SimPowerSystems, відомий читачеві вимірювальний блок Scope і новий –мультиплексор Mux (розділ SignalRouting) бібліотеки Simulink.

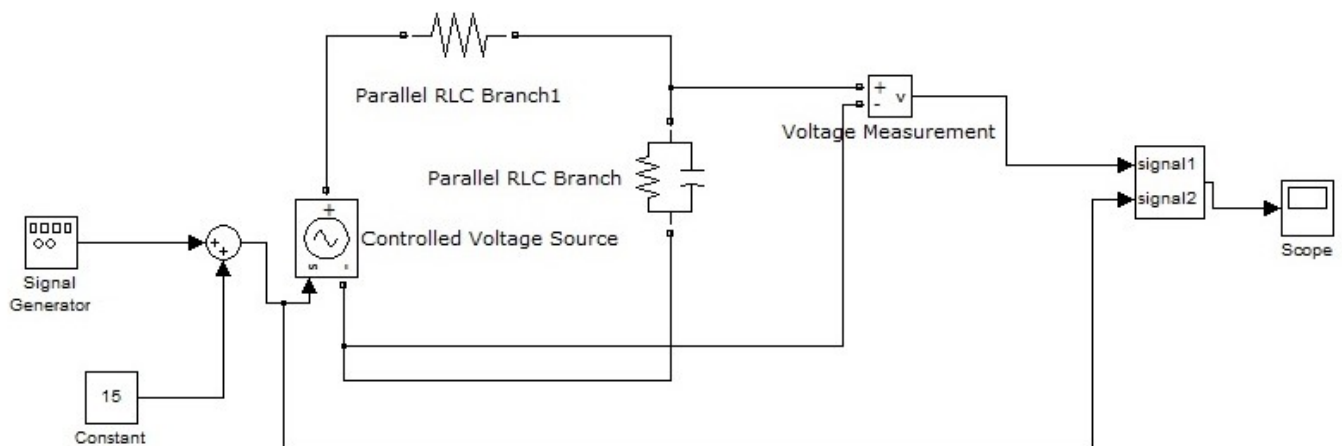


Рисунок 1.10 – Принципова досліджувана схема інтегратора з RC-ланцюга.

Тривалість процесу моделювання Stoptimes вибирається 0,08 с, а максимальний крок дискретизації Maxstepsize – 0,001 с. За рахунок мультиплексора входні сигнали об'єднуються в вектор, що дозволяє вивести на екран осцилографа відразу два сигнали, накладених один на одного. Видно, що перехідний процес, обумовлений наявністю постійної складової, закінчується на другому періоді прямокутних імпульсів, а вихідні трикутні імпульси мають нелінійний характер наростання і спаду напруги.

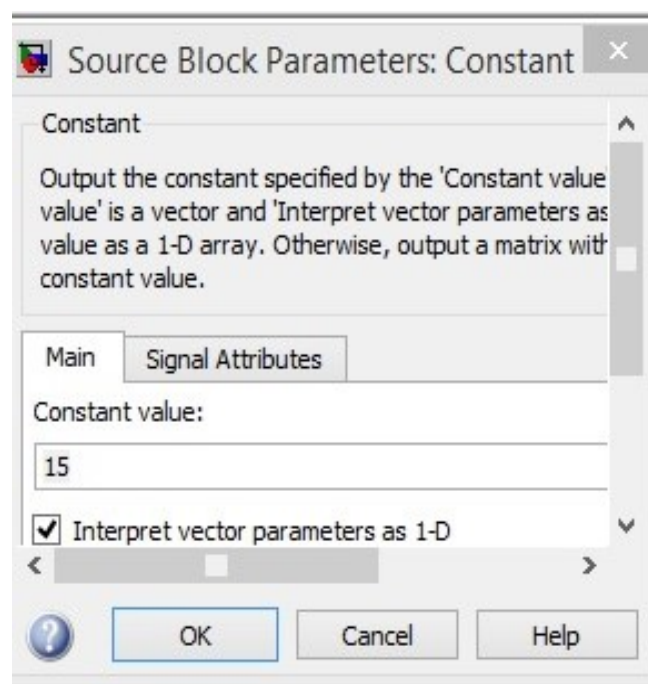


Рисунок 1.11 – Параметри схеми.

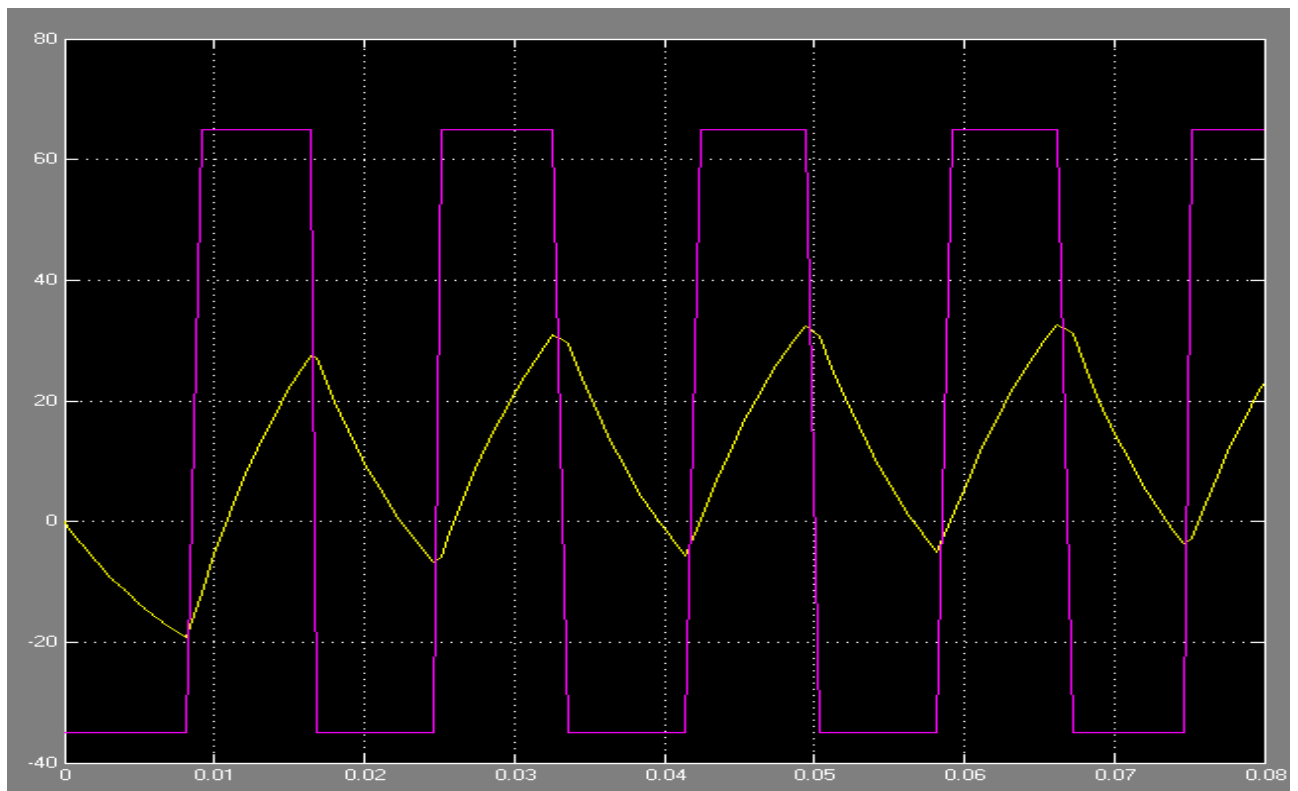


Рисунок 1.12 – Отримані характеристики RC-ланцюга.

Контрольні питання та завдання

1. Поняття дільник напруги. Застосування, види.
2. Інтегруюча та диференціююча ланки.
3. Схема RC-кола, типи, принцип її роботи.
4. Схема RL-кола, типи, принцип її роботи.

ТЕМА 2: ВИПРЯМЛЯЧІ

КОМП'ЮТЕРНИЙ ПРАКТИКУМ № 2 «ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ ВИПРЯМЛЯЧІВ»

Мета роботи - познайомитися з найпростішими схемами випрямлячів, побудувати моделі та провести моделювання заданих схем випрямлячів. Побудувати та дослідити основні характеристики випрямлячів.

Основні теоретичні відомості

Випрямлячі — це електротехнічні пристрої, призначені для перетворення енергії джерела напруги змінного струму в енергію напруги постійного струму.

Склад випрямляча показано на узагальненій структурній схемі, зображеній на рис. 2.1.

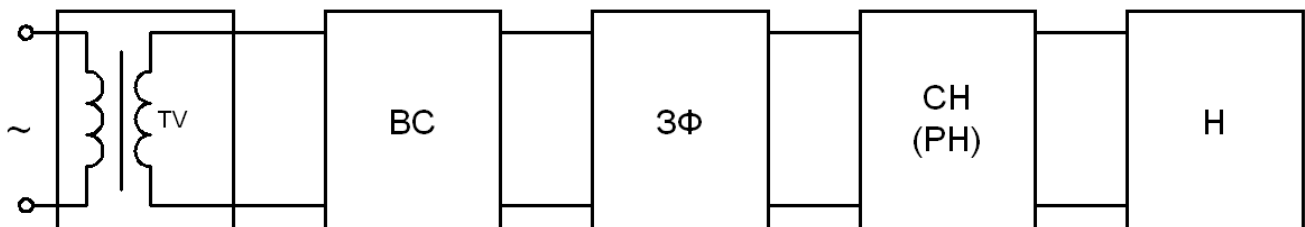


Рисунок 2.1 - Структурна схема випрямляча:

TV — трансформатор напруги; *ВС* — вентильна схема; *ЗФ* — згладжуючий фільтр;
СН (РН) — стабілізатор напруги (регулятор напруги); *Н* — навантаження

Трансформатор призначений для перетворення величини напруги мережі до значення, необхідного для роботи випрямляча. Він також забезпечує електричну (гальванічну) розв'язку мережі й навантаження.

Вентильна схема перетворює змінну напругу у випрямлену — пульсуючу однополярну. Вона може виконуватись на напівпровідникових ключах.

Згладжуючий фільтр перетворює випрямлену напругу в постійну. Фільтри виконуються на реактивних елементах, що мають властивість накопичувати електричну енергію: конденсаторах, дроселях. Такі фільтри називаються пасивними.

Для живлення радіоелектронних пристроїв часто використовують активні фільтри, що будуються на транзисторах, операційних підсилювачах та реактивних елементах.

Стабілізатор напруги підтримує напругу на навантаженні і незмінному рівні у разі зміни напруги мережі або навантаження у заданих межах.

У разі необхідності регулювання напруги на навантаженні за необхідним законом і у заданих межах, використовують регулятори напруги. Зазначимо, що стабілізатор також є різновидом регулятора, у якого забезпечується автоматичне регулювання за ознакою постійності значення напруги на навантаженні.

Регулятор (стабілізатор) може бути увімкнено і з боку змінної напруги (до трансформатора).

Параметри вузлів випрямляча та їх елементів, режими їх роботи, повинні бути узгоджені з заданими умовами роботи навантаження. Навантаження також вважають елементом випрямляча, тому, що зміни його опору в процесі роботи впливають на режим роботи всього пристрою.

Згладжуючий фільтр, стабілізатор (регулятор), а іноді й трансформатор може не входити до складу випрямляча, в яких у ньому немає необхідності.

Крім вказаних вузлів, випрямляч може мати вузли і елементи захисту від короткого замикання, перевантаження, зниження напруги мережі. Це такі елементи та вузли - запобіжник, автоматичний вимикач, електронний пристрій захисту, елементи і вузли індикації наявності й значення напруги і струму, а також вузли діагностики працездатності.

Випрямлячі класифікують за числом фаз — однофазні та багатofазні (останні — найчастіше трифазні). За потужністю випрямлячі бувають малої потужності (до 100 Вт), середньої (до 10 кВт) та великої (понад 10 кВт).

Випрямлячі є некеровані та керовані. Перші будуються на некерованих вентилях — діодах, другі — на керованих, наприклад, на тиристорах.

За принципом дії випрямлячі поділяються на одно- та двотактні.

Однотактними називають випрямлячі, у яких по вторинній обмотці трансформатора струм протікає один раз за період напруги мережі й лише у одному напрямку.

Важливим параметром випрямляча є **кратність пульсацій випрямленої напруги m** — відношення частоти пульсацій випрямленої напруги до частоти мережі. У однотактних випрямлячів він відповідає числу фаз мережі.

Двотактними (двонапівперіодними) називають випрямлячі, у яких по вторинній обмотці трансформатора струм, за період напруги мережі, протікає двічі й у різних напрямках. Кратність пульсацій у двотактних випрямлячів дорівнює подвоєному числу фаз.

Робота випрямляча фактично полягає у тому, що навантаження за допомогою ключів вмикається до джерела енергії напруги змінного струму, щоб за тривалість кожного півперіоду його напруги (позитивного і негативного) струм у навантаженні протікав в одному напрямку. Виходячи з цього, найважливішим вузлом випрямляча є вентильна схема — схема випрямлення.

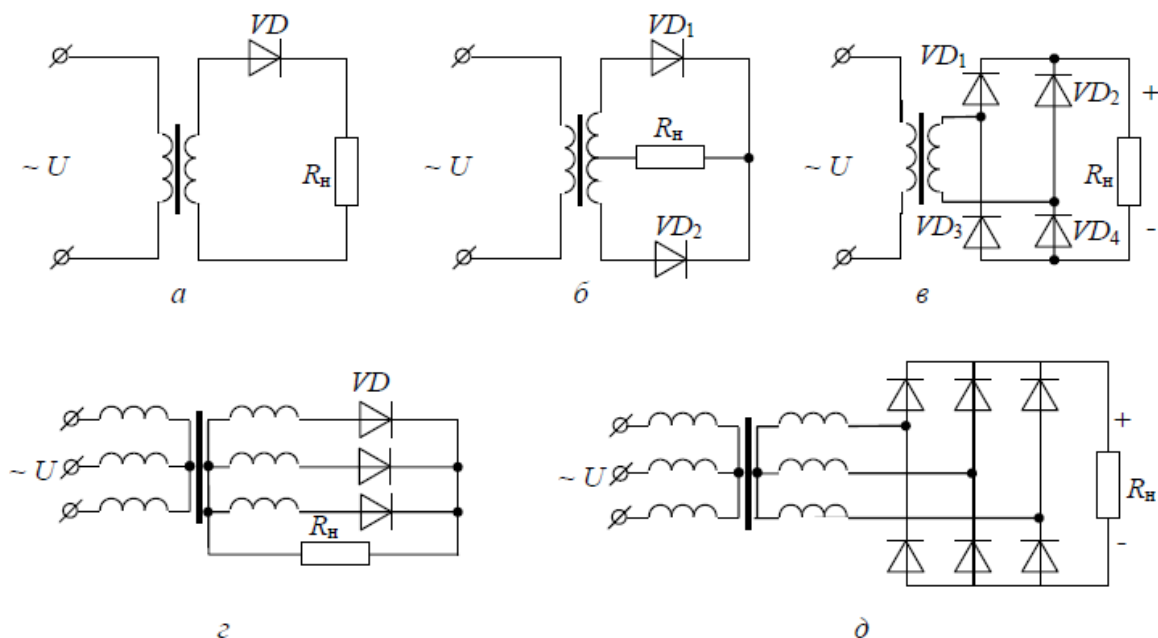


Рисунок 2.2 - Основні схеми випрямлячів: *a* – однофазна однопівперіодна; *б* – однофазна з нульовим виводом; *в* – однофазна мостова; *г* – трифазна нульова; *д* – трифазна мостова.

Завдання для проведення роботи

Завдання 2.1 Побудова моделі однофазного випрямляча з RL – навантаженням.

Побудувати модель та провести вимірювання струму і напруги на діоді та навантаженні.

Вихідні дані для моделювання:

- напруга живлення $U = 220$ В;
- частота змінного струму $f = 50$ Гц;
- активний опір навантаження $R = 2$ Ом;
- індуктивний опір навантаження $L = 5 \cdot 10^{-3}$ Гн.

Побудова моделі:

Таблиця 2.1 - Блоки та параметри моделі у середовищі MATLAB/Simulink:

Бібліотека	Блок	Параметри
SimPowerSystems/Electrical Source	AC Voltage Source	$200+4 \cdot N$
SimPowerSystems/Power Electronics	Diode	–
SimPowerSystems/Measurements	Current Measurement	–
SimPowerSystems/Measurements	Voltage Measurement	–
SimPowerSystems/Elements	Series RLC Branch	$R = 2+2 \cdot N$ (Ом), $L = (5+N) \cdot 10^{-3}$ (Гн)
Simulink/Sinks	Scope	–
SimPowerSystems/Elements	Ground	–
Simulink/Signal Routing	Demux	–
Час моделювання		0,2 с
Вирішувач		ode45

Для побудови моделі необхідно відкрити дерево SimPowerSystems в Simulink і активізувати рядок дерева Electrical Sources (джерела електричної

енергії). У правій частині вікна відкривається розділ Electrical Sources. За допомогою лівої кнопки миші (ЛК) потрібно перетягнути піктограму джерела змінної напруги AC Voltage Source у вікно моделі.

Діючи аналогічно, у вікно моделі по черзі переміщують піктограму послідовного RLC-ланцюга Series RLC Branch з розділу Elements (електротехнічні елементи), піктограми вольтметра Voltage Measurement і амперметра Current Measurement з розділу Measurements (вимірювальні та контрольні пристрої). З бібліотеки Simulink – піктограми осцилографа Scope з розділу Sinks (приймачі та вимірники сигналів) і Demux з розділу Signal Routing (блоки, що визначають маршрути сигналів). Проводяться з'єднання блоків у схему (рис. 2.2), в якій до інформаційного порту **m** діода підключається осцилограф Scope через демультиплексор Demux, що виділяє зі загального векторного Simulink-сигналу два окремі сигнали, які виводяться на підключений осцилограф.

Осцилограф має чотири входи. Кількість входів установлюється після виклику у вікні осцилограм Scope (рис. 2.3) кнопкою Parameters іншого вікна з іменем Parameters Scope і закладкою General – загальні параметри, де й установлюється необхідна кількість осей Number axes.

У блоках настроювання параметрів проводяться установки живлячої напруги 220 В, частоти 50 Гц (вікно параметрів джерела AC Voltage Source), опору 2 Ом, індуктивності 5 мГн і ємності inf (нескінченності) [вікно параметрів блока Series RLC Branch].

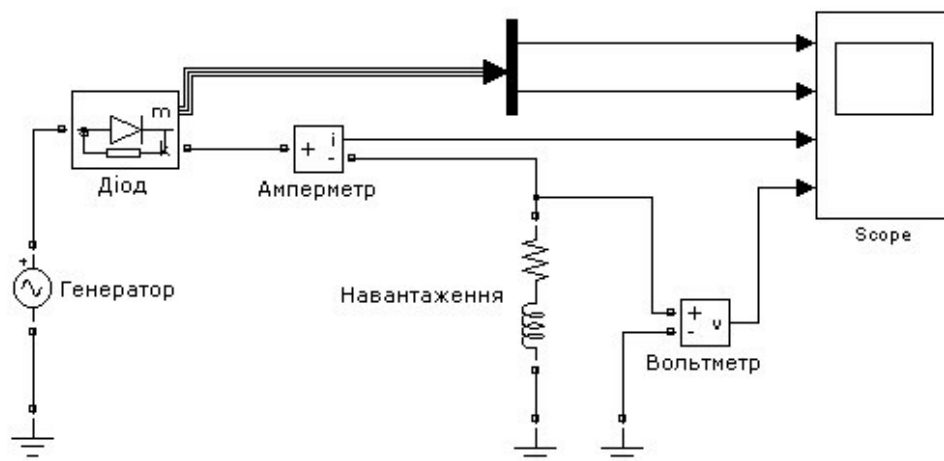


Рисунок 2.3 - Модель одноктного випрямляча з RL – навантаженням

Вікно параметрів діода з установленими настроюваннями наведене на рис. 2.4. Якщо в ланцюзі, Snubber зменшити опір резистора до величини 10-20 Ом, то на кривій струму навантаження можуть з'явитися високочастотні коливання, що свідчить про необхідність уважного ставлення до вибору параметрів елементів цього ланцюга.

Менш чутливі процеси комутації діода до вибору величини ємності даного ланцюжка, але зниження її нижче 10^{-7} Ф також може викликати появу аналогічних коливань. Індуктивність L_{on} починає позначатися на картині процесів у разі значення більш 1...5 мГн.



Рисунок 2.4 - Вікно параметрів настроювання блока Scope

Допускається вибирати величину цього параметра нескінченно малою або навіть нульовою. Часові діаграми струму і напруги на діоді та струму і напруги на навантаженні наведено на осцилограмах (рис. 2.5).

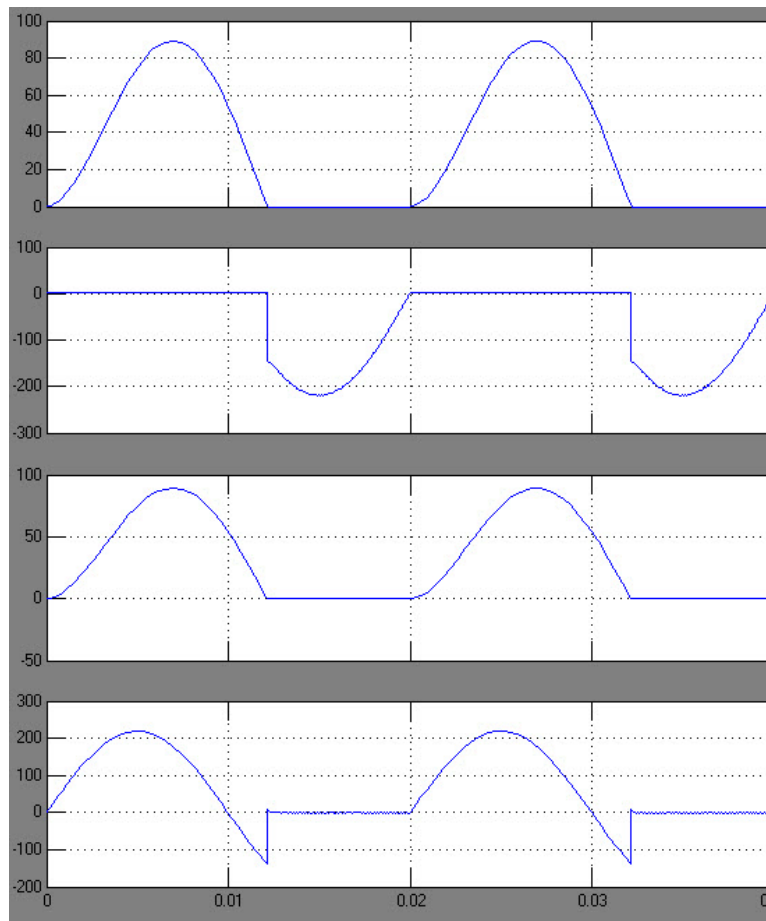


Рисунок 2.5 - Часові діаграми струму і напруги

Завдання 2.2 Побудова моделі однофазного тиристорного випрямляча з RL – навантаженням

Побудувати модель та провести вимірювання напруги і струму на навантаженні.

Вихідні дані для моделювання:

- напруга живлення $U = 100$ В;
- частота змінного струму $f = 50$ Гц;
- активний опір навантаження $R = 2$ Ом;
- індуктивний опір навантаження $L = 5$ мГн;
- кут відмикання тиристора 90° .

Таблиця 2.2 - Блоки та параметри моделі у середовищі MATLAB/Simulink:

Бібліотека	Блок	Параметри
SimPowerSystems/Electrical Source	AC Voltage Source	$100+5 \cdot N$
SimPowerSystems/Power Electronics	Thyristor	—
SimPowerSystems/Measurements	Current Measurement	—
SimPowerSystems/Measurements	Voltage Measurement	—
SimPowerSystems/Elements	Series RLC Branch	$R = 2+2 \cdot N$ (Ом), $L = (5+N) \cdot 10^{-3}$ (Гн)
SimPowerSystems/Elements	Ground	—
Simulink/Sources	Pulse Generator	Period = 0.02, Pulse Width = 5%, Phase Delay = 0.02/4
Simulink/Sinks	Scope	—
Simulink/Sinks	Terminator	—
Час моделювання		0,2 с
Вирішувач		ode45

Зібрану схему моделі випрямляча представлено на рис. 2.6. та її виконано аналогічно схемі діодного випрямляча на рис.2.3.

Особливості розглянутої схеми: відмикання тиристора здійснюється від генератора Pulse Generator, підключеного до порту *g*; інформаційний порт *m* тиристора заглушений (підключений блок Terminator, що перебуває в розділі Sinks бібліотеки Simulink). У разі відсутності блока Terminator у командному вікні буде видано помилку.

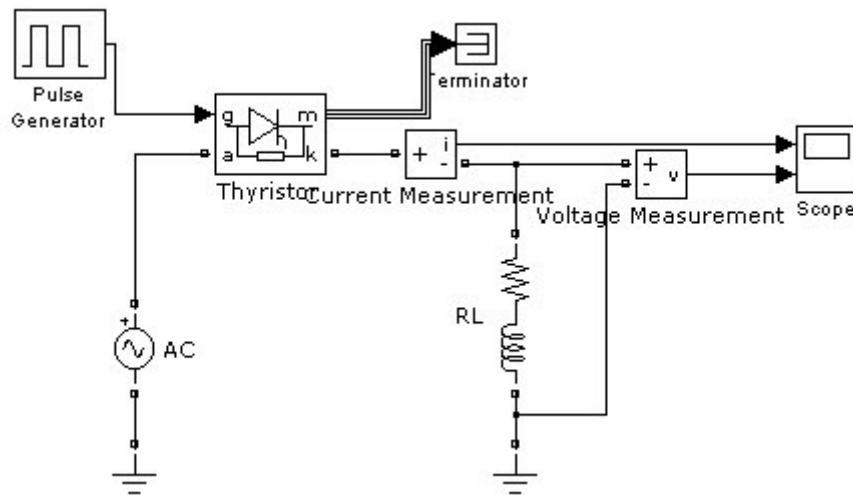


Рисунок 2.6 - Модель однофазного тиристорного випрямляча з RL – навантаженням

Параметри генератора Pulse Generator задані у вікні (рис. 2.7), з якого видно, що період (Period) становить 0,02 с, ширина імпульсу (Pulse Width) – 5% від періоду, зсув фази (Phase Delay) – чверть періоду (90°). Вікно для налаштування параметрів тиристора наведено на рис. 2.8.

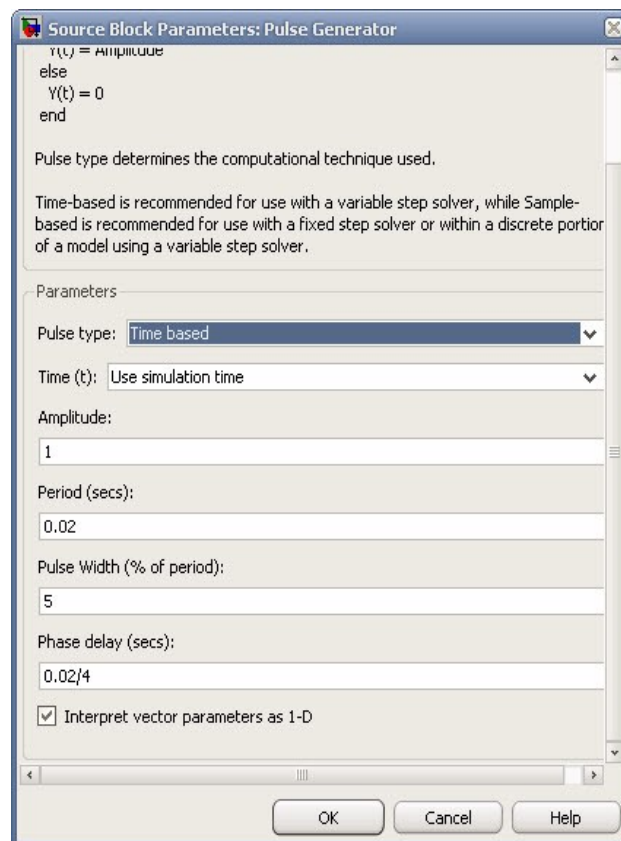


Рисунок 2.7 - Вікно для налаштування параметрів Pulse Generator

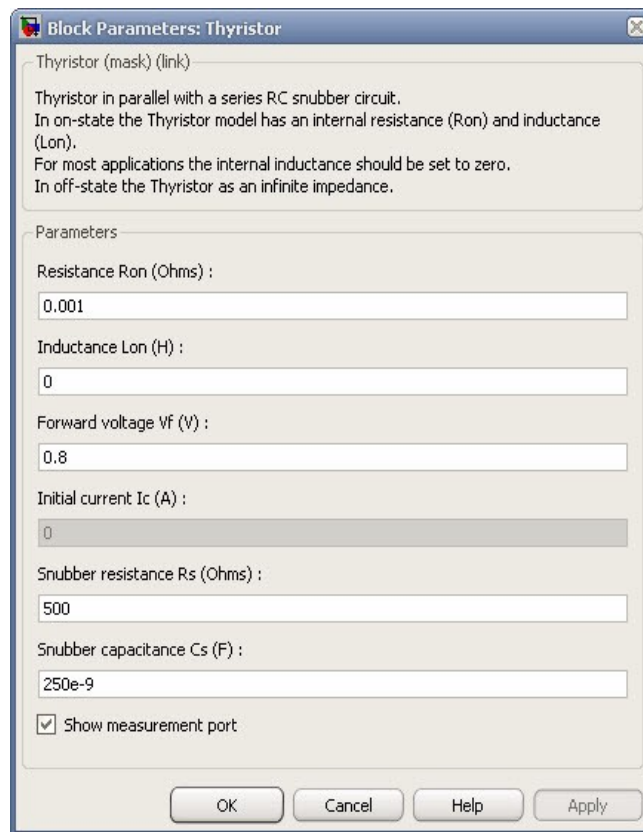


Рисунок 2.8 - Вікно для настроювання параметрів тиристора

Результати моделювання представлені у вигляді часових діаграм струму через навантаження та напруги на навантаженні на рис. 2.9.

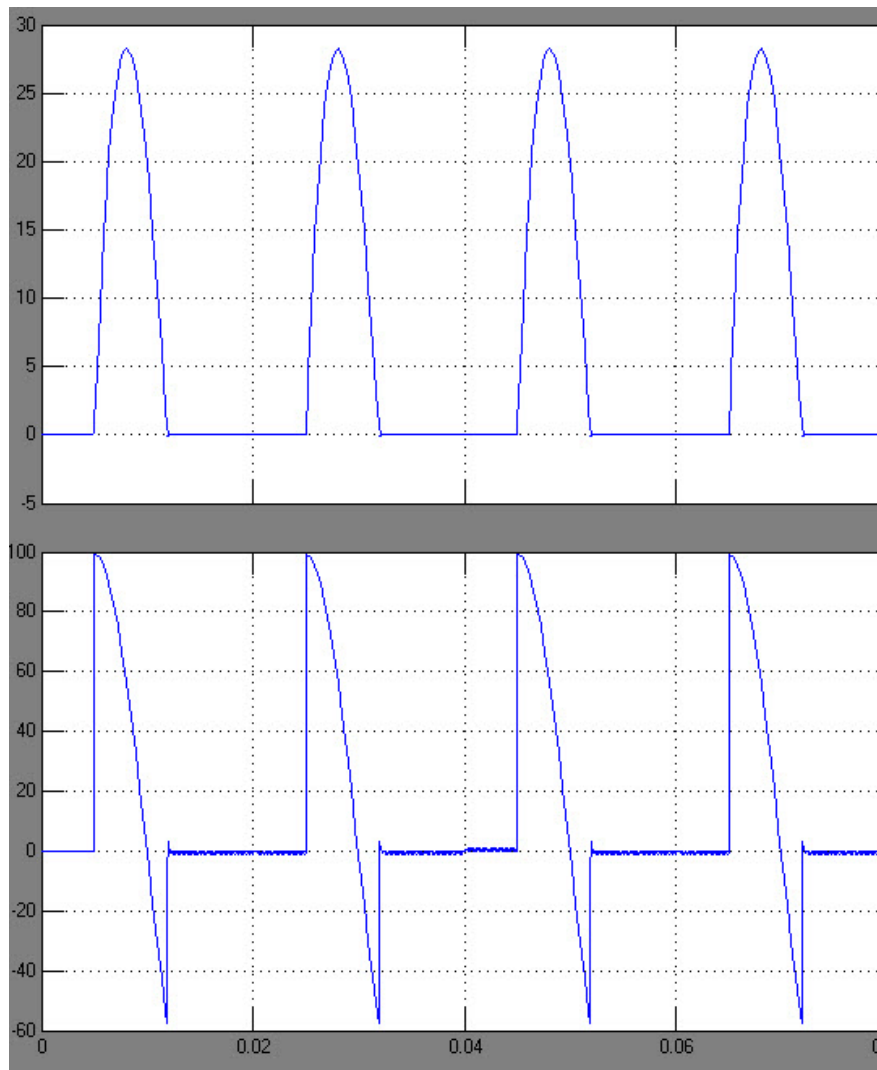


Рисунок 2.9 - Часові діаграми струму і напруги на навантаженні

Завдання 2.3 Побудова моделі трифазного випрямляча з R – навантаженням

Мета роботи- побудувати модель і провести виміри напруги на навантаженні.

Вихідні дані для моделювання:

- трифазна напруга $U = 380$ В;
- частота змінного струму $f = 50$ Гц;
- зсув фази 90° ;
- навантаження з опором $R = 500$ Ом.

Таблиця 2.3 - Блоки та параметри моделі у середовищі MATLAB/Simulink:

Бібліотека	Блок	Параметри
SimPowerSystems/Electrical Source	Three-Phase Source	$380+5 \cdot N$, див. рис. 10
SimPowerSystems/Power Electronics	Universal Bridge	Number of bridge arms – 3 Power electronic device – Diodes
SimPowerSystems/Measurements	Current Measurement	–
SimPowerSystems/Measurements	Voltage Measurement	–
SimPowerSystems/Elements	Series RLC Branch	$R = 500+5 \cdot N$
SimPowerSystems/Elements	Ground	–
Simulink/Sources	Pulse Generator	
Час моделювання		0,2 с
Вирішувач		ode45

Схему випрямляча наведено на рис. 2.10. Вона містить трифазне джерело живлення 3-phase Source (розділ Electrical Sources), універсальний випрямний міст Universal Bridge (розділ Power Electronics), опір навантаження R Series RLC Branch (розділ Elements), вольтметр Voltage Measurement (розділ Measurements) і осцилограф Scope (розділ Sinks).

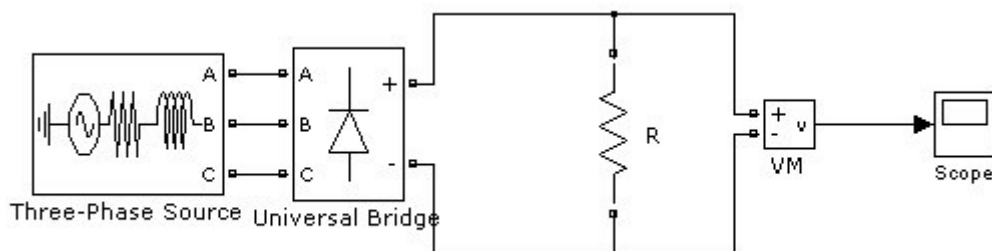


Рисунок 2.10 - Модель трифазного випрямляча з R – навантаженням

Деяка специфіка налаштування полягає у виборі параметрів блока джерела живлення та блока випрямного моста.

Наведемо короткі відомості про параметри налаштувань трифазного джерела живлення.

Вікно налаштувань параметрів блока:

Phase-to-phase rms voltage (V) – діюче значення лінійної напруги;

Phase angle of phase A (deg) – початкова фаза напруги у фазі А (градуси);

Frequency (Hz) – частота (Гц) змінної напруги джерела;

Internal connection – з'єднання фаз джерела. Значення параметра вибирається зі списку:

Y – зірка;

Yn – зірка з нульовим проводом;

Yg – зірка зі заземленою нейтраллю.

Specify impedance using short-circuit level – завдання повного опору джерела з використанням параметрів короткого замикання. Після установки цього параметра у вікні діалогу з'являються додаткові графи для введення параметрів короткого замикання джерела.

Source resistance (Ohms) – власний опір джерела (Ом);

Source inductance (H) – власна індуктивність джерела (Гн);

3-phase short-circuit level at base voltage (VA) – потужність короткого замикання під час базового значення напруги;

Base voltage (Vrms ph-ph) – діюче значення лінійної базової напруги. Величина лінійної базової напруги джерела, з урахуванням якого визначена потужність короткого замикання;

X/R ratio – відношення індуктивного та активного опорів.

У разі завдання імпедансу (комплексного опору) джерела через потужність короткого замикання (КЗ) реактивний опір джерела визначається за виразом:

$$X = \frac{U_{\text{кз}}^2}{Q_{\text{кз}}} \quad (2.1)$$

де $Q_{\text{кз}}$ – потужність короткого замикання; $U_{\text{кз}}$ – напруга джерела, під час якої визначена потужність короткого замикання. Активний опір джерела знаходять за виразом

$$R = \frac{X}{k} \quad (2.2)$$

де k – параметр X/R .

Встановлені параметри джерела показано на рис.2.11

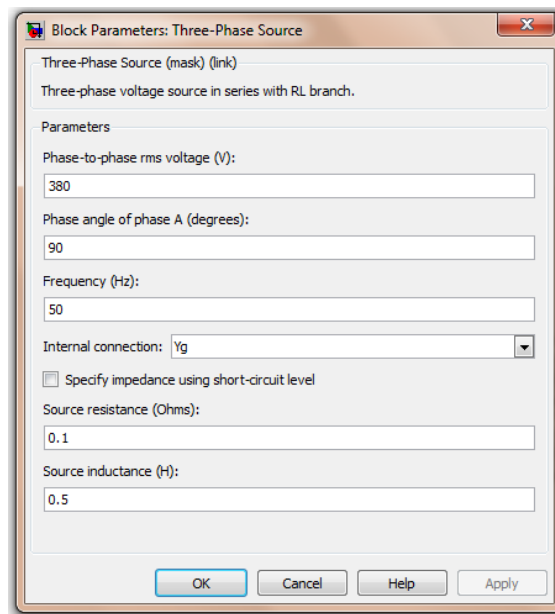


Рисунок 2.11 - Вікно параметрів джерела

Аналогічно встановлювані параметри універсального моста відображено на рис. 2.12

Вихідна напруга моделі трифазного випрямляча з активним навантаженням наведена на рис. 2.13

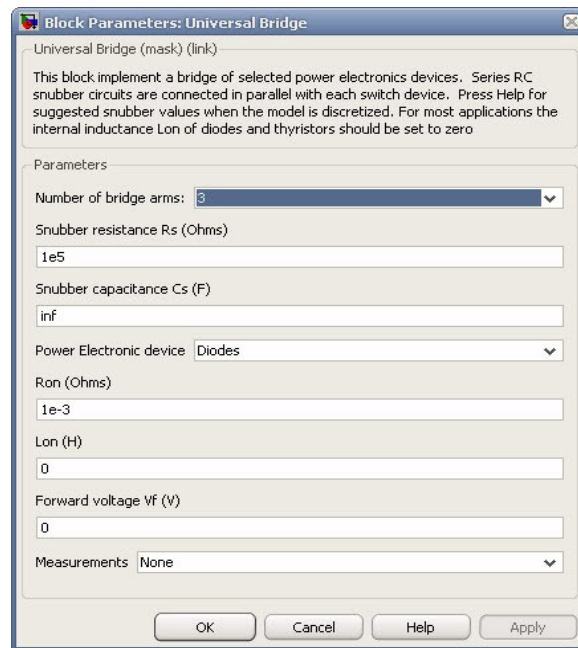


Рисунок 2.12 - Вікно параметрів блока Universal Bridge

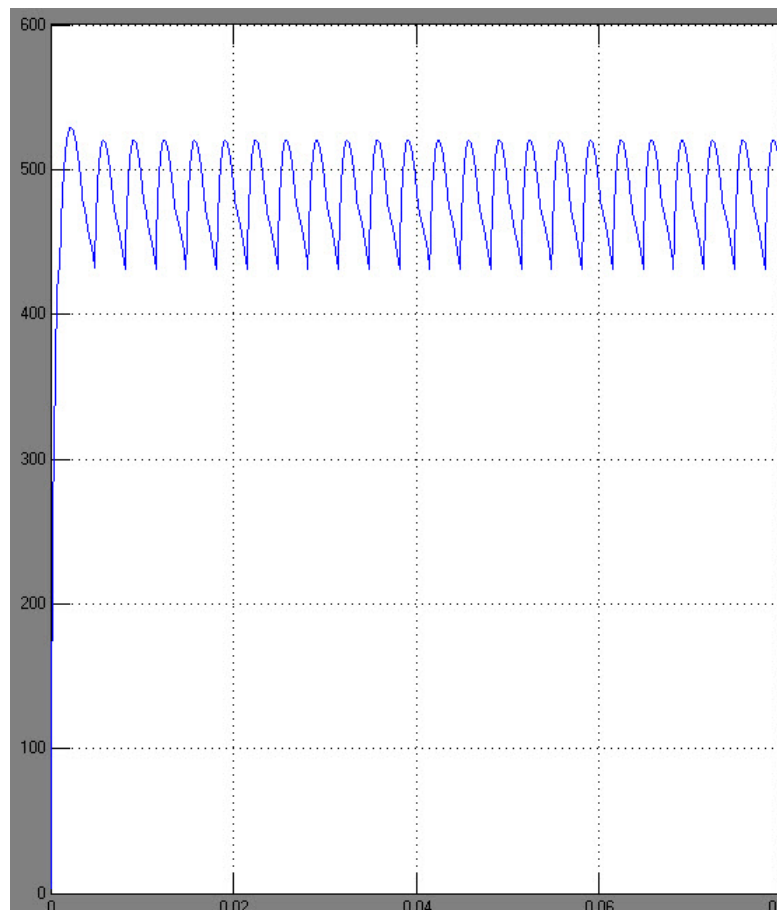


Рисунок 2.13 - Графік вихідної напруги моделі трифазного випрямляча

Завдання 2.4 Побудова моделі двонапівперіодного випрямляча з нульовою точкою трансформатора і ємнісним фільтром

Провести вимірювання напруги на навантаженні, струму й напруги на діоді.

Вихідні дані для моделювання:

- живильна змінна напруга $U = 220$ В
- частота $f = 50$ Гц;
- вихідна напруга $U_{\text{вих}} = 40\text{-}45$ В;
- опір навантаження $R_{\text{н}} 25$ Ом;
- амплітуда змінної складової напруги на навантаженні до 15% (7 В).

Модель випрямляча (рис. 2.14) містить джерело живлення AC Voltage з напругою 220 В, лінійний трансформатор Linear Transformer (вікно налаштування його параметрів наведене на рис. 2.15), два діоди Diode, C-фільтр, підключений паралельно навантаженню R . Для спостереження через порт m за струмом і напругою на діоді використовуються демультіплексор Demux і осцилограф Scope1 з двома входами. Інший осцилограф Scope застосовується для одержання тимчасової діаграми вихідної напруги.

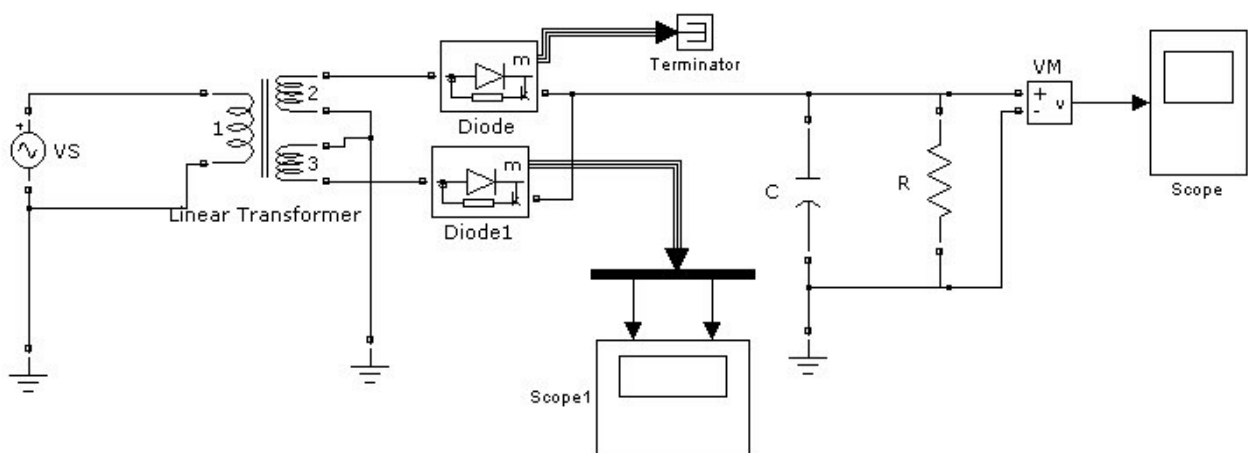


Рисунок 2.14 - Модель двонапівперіодного випрямляча з нульовою точкою трансформатора і ємнісним фільтром

Таблиця 2.4 - Блоки та параметри моделі у середовищі MATLAB/Simulink:

Бібліотека	Блок	Параметри
SimPowerSystems/Electrical Source	AC Voltage Source	220
SimPowerSystems/Power Electronics	Diode	—
SimPowerSystems/Measurements		—
SimPowerSystems/Measurements	Voltage Measurement	—
SimPowerSystems/Elements	Series RLC Branch	$R = 20 + 5 \cdot N$ (Ом)
SimPowerSystems/Elements	Series RLC Branch	$C = (1 + N) \cdot 10^{-3}$ (Ф)
SimPowerSystems/Elements	Ground	—
Simulink/Sinks	Scope	—
Simulink/Signal Routing	Demux	—
Simulink/Sinks	Terminator	—
SimPowerSystems/Elements	Linear Transformer	
Час моделювання		0,2 с
Вирішувач		ode45

Для настроювання моделі у вікнах параметрів блоків слід встановити величину 220 В и частоту 50 Гц живлячої напруги джерела AC Voltage, параметри трансформатора (рис. 2.15), опір навантаження 25 Ом, ємність фільтра 0,001 Ф. Зазначимо, що час моделювання задано 0,2 с.

Часові діаграми напруги на фільтрі, струму і напруги на діоді показано на рис. 2.16 та 2.17 відповідно.

Block Parameters: Linear Transformer

Linear Transformer (mask) (link)

Implements a three windings linear transformer.

Click the Apply or the OK button after a change to the Units popup to confirm the conversion of parameters.

Parameters

Units: **pu**

Nominal power and frequency [Pn(VA) fn(Hz)]:
[100 50]

Winding 1 parameters [V1(Vrms) R1(pu) L1(pu)]:
[220 0 0]

Winding 2 parameters [V2(Vrms) R2(pu) L2(pu)]:
[50 0 0]

☒ Three windings transformer

Winding 3 parameters [V3(Vrms) R3(pu) L3(pu)]:
[50 0 0]

Magnetization resistance and reactance [Rm(pu) Lm(pu)]:
[500 500]

Measurements: **None**

☐ Use SI units

OK Cancel Help Apply

Рисунок 2.15 - Вікно параметрів трансформатора

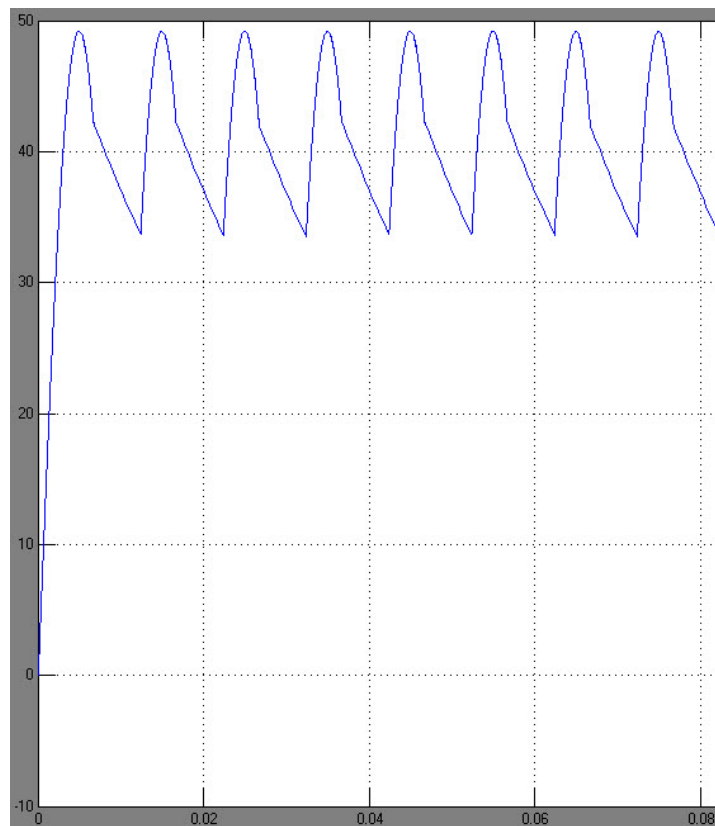


Рисунок 2.16 - Графік напруги на навантаженні

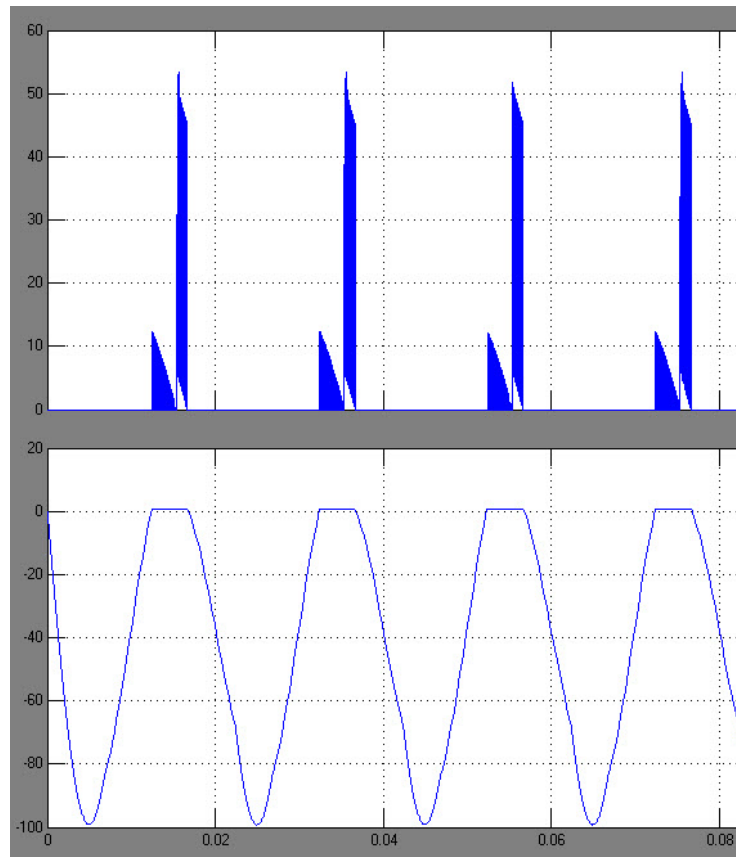


Рисунок 2.17 - Графік струму і напруги на діоді

Контрольні питання та завдання

1. Навести структурну схему випрямляча.
2. Призначення кожної складової випрямляча.
3. Навести блоки, з яких складається модель двонапівперіодного випрямляча з нульовою точкою трансформатора і ємнісним фільтром.
4. Класифікація випрямлячів.
5. Класифікація випрямлячів за принципом дії.
6. Навести основні електричні схеми випрямлячів.

ТЕМА 3: АВТОНОМНІ ІНВЕРТОРИ

КОМП'ЮТЕРНИЙ ПРАКТИКУМ № 3 «ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ АВТОНОМНИХ ІНВЕРТОРІВ»

Мета роботи - познайомитися з моделями автономних інверторів, побудувати моделі та провести моделювання заданих схем автономних інверторів. Провести гармонічний аналіз для цих схем інверторів.

Основні теоретичні відомості

Автономні інвертори – це пристрої, що працюють на автономне навантаження і призначені для перетворення напруги постійного струму у напругу змінного струму заданої або регульованої частоти.

Застосовують автономні інвертори:

- у системах електроживлення споживачів змінного струму, коли єдиним джерелом живлення є джерело напруги постійного струму (наприклад, акумуляторна або сонячна батарея);
- у системах гарантованого електропостачання у разі зникнення напруги мережі живлення (наприклад, для особистих потреб електростанцій – для живлення пристроїв контролювання, вимірювання та захисту);
- для живлення технологічного обладнання, частота напруги якого відрізняється від промислової частоти 50 Гц;
- для частотного регулювання швидкості асинхронних двигунів;
- для живлення споживачів змінного струму від ліній електропостачання постійного струму;
- для перетворення постійної напруги одного рівня у постійну напругу іншого рівня (конвертування напруг).

Комутаційними елементами в інверторах є тиристори або силові транзистори.

Залежно від специфіки електромагнітних процесів розрізняють інвертори струму та інвертори напруги.

Перед побудовою моделей напівмостового та мостового інверторів струму (надалі – Моделей) необхідно провести налаштування Simulink-моделі таким чином:

- додати до моделі блок **powergui** бібліотеки SimPowerSystem (рис.3.1);

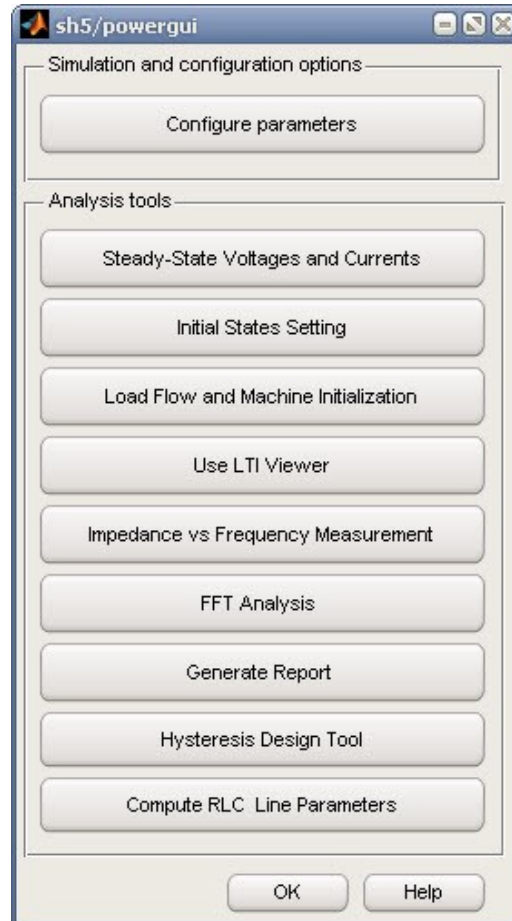


Рисунок 3.1 - Вікно блоку powergui

- провести налаштування блоку згідно з рис.3.2, для чого перейти на вкладання Configure parameters;

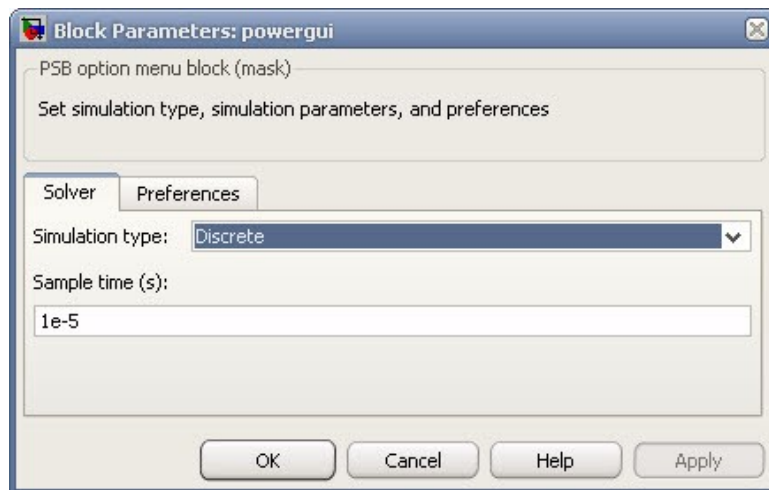


Рисунок 3.2 - Вікно налаштування блоку powergui

Параметри:

Simulation type: Discrete;

Sample time: 1e-5.

5. Побудову моделей необхідно виконати в одному модельному вікні.

6. Особливістю лабораторної роботи є використання блоку Multimeter для побудови графічних залежностей. Налаштування блоку Multimeter наведено на рис.3.3. Опція Plot selected measurements має бути ввімкнута.

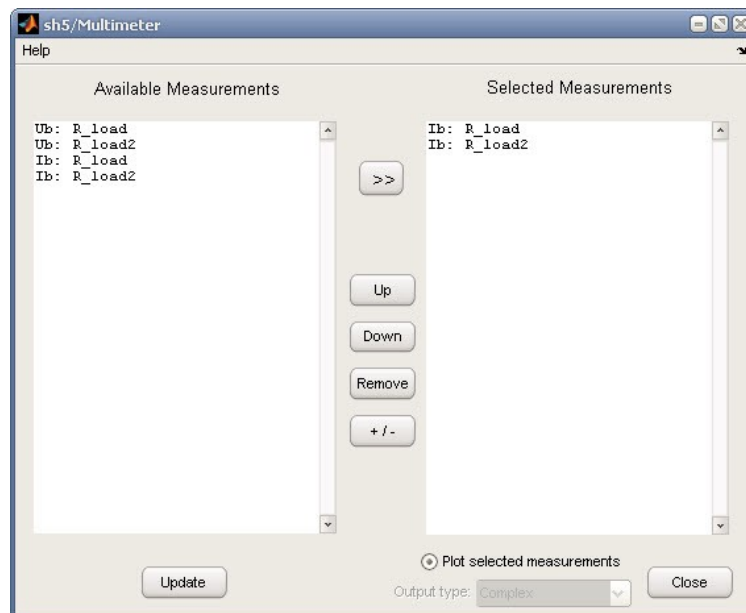


Рисунок 3.3 - Вікно налаштування блоку Multimeter

Для застосування блоку Multimeter необхідно настроїти параметри блоку Series RLC Branch відповідно до рис.3.4

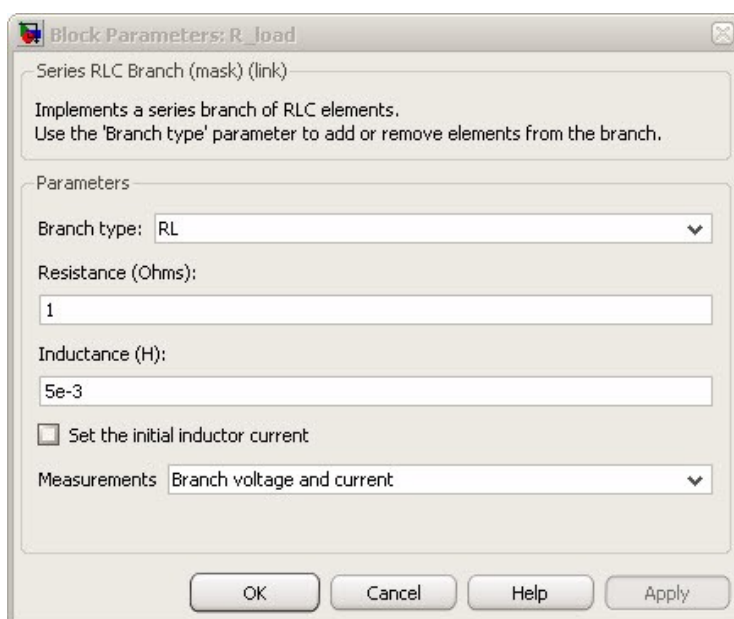


Рисунок 3.4 - Вікно налаштування блоку Series RLC Branch

7. Для проведення аналізу модель має містити блок To Workspace (рис.3.5) бібліотеки Simulink/Sinks з налаштуваннями приведеними на рис.6.

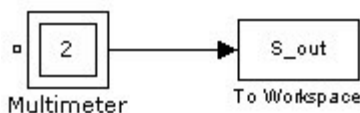


Рисунок 3.5 - Блок To Workspace

Налаштування блоку To Workspace:

Variable name: S_out;

Save format: Structure With Time.

8. Для побудови спектрального складу сигналу використовується FFT Analysis. Налаштування панелей блоку приведені на рис.3.6

Structure :
S_out
Input :
input 1
Signal number:
1

FFT window
Start time (s): 0.02
Number of cycles: 5
Fundamental frequency (Hz): 50

FFT settings
Display style:
List (relative to fundamental)
Base value: 1.0
Frequency axis:
Hertz
Max Frequency (Hz): 500

Рисунок 3.6 - Вікна налаштування блоку FFT Analysis

Параметри:

Structure: S_out;

Input: input 1;

Signal number: 1 чи 2;

Start time: 0.02 с;

Number of cycles: 5;

Fundamental frequency: 50 Гц;

Max Frequency: 500 Гц.

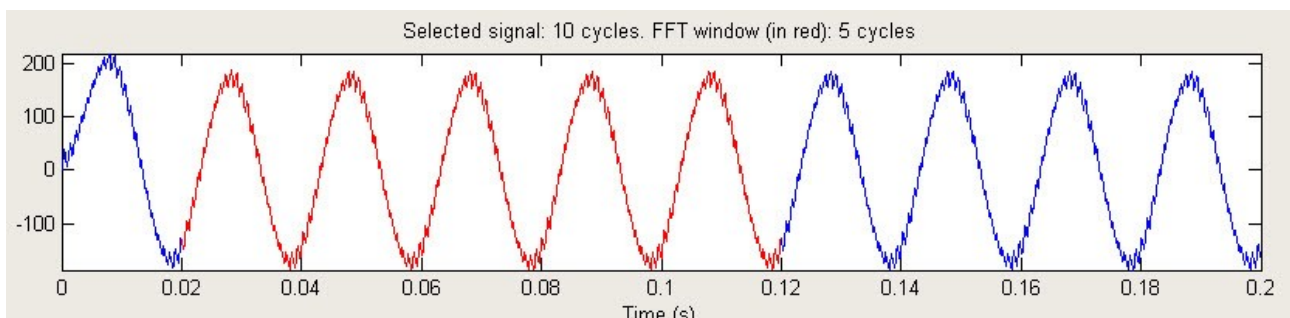


Рисунок 3.7 - вікно FFT аналізу

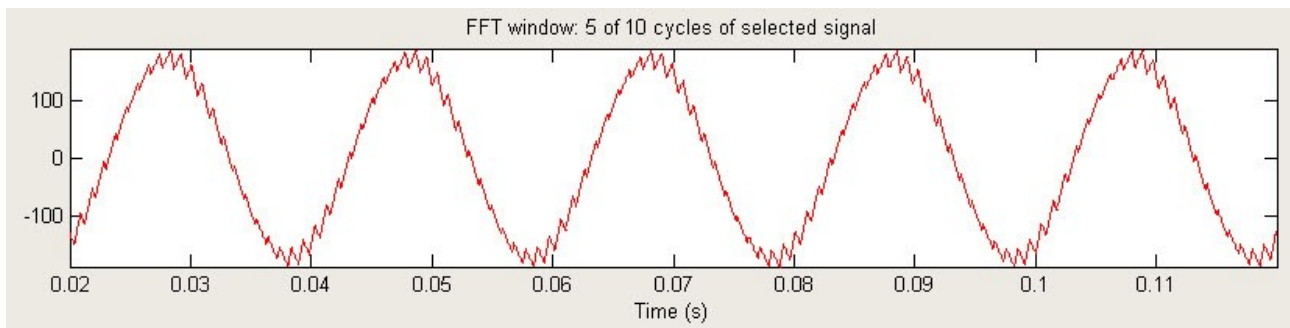


Рисунок 3.8 - вікно FFT аналізу

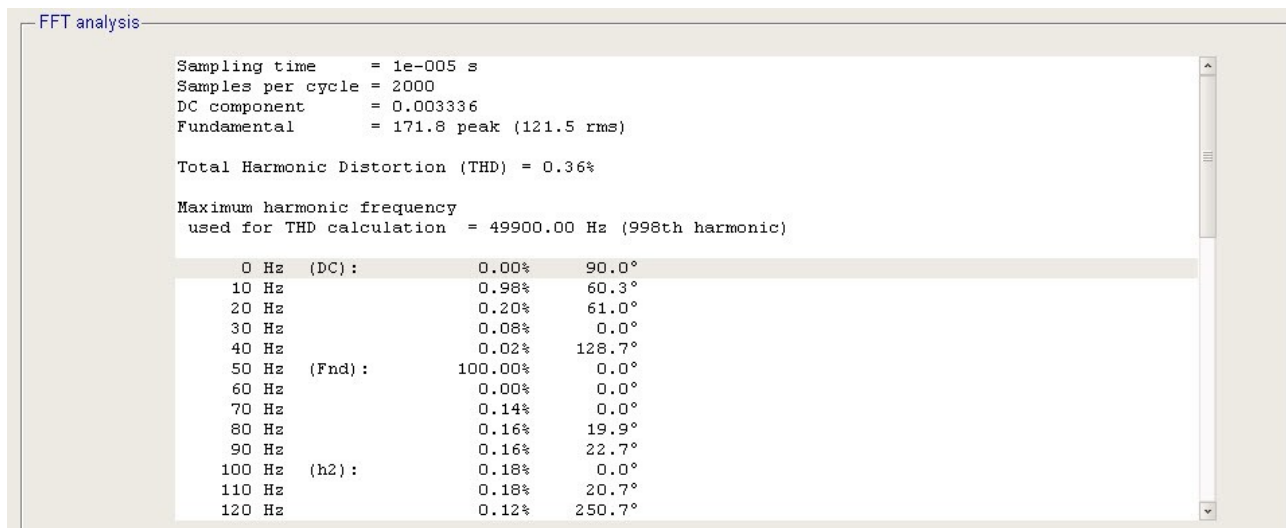


Рисунок 3.9 - вікно FFT аналізу

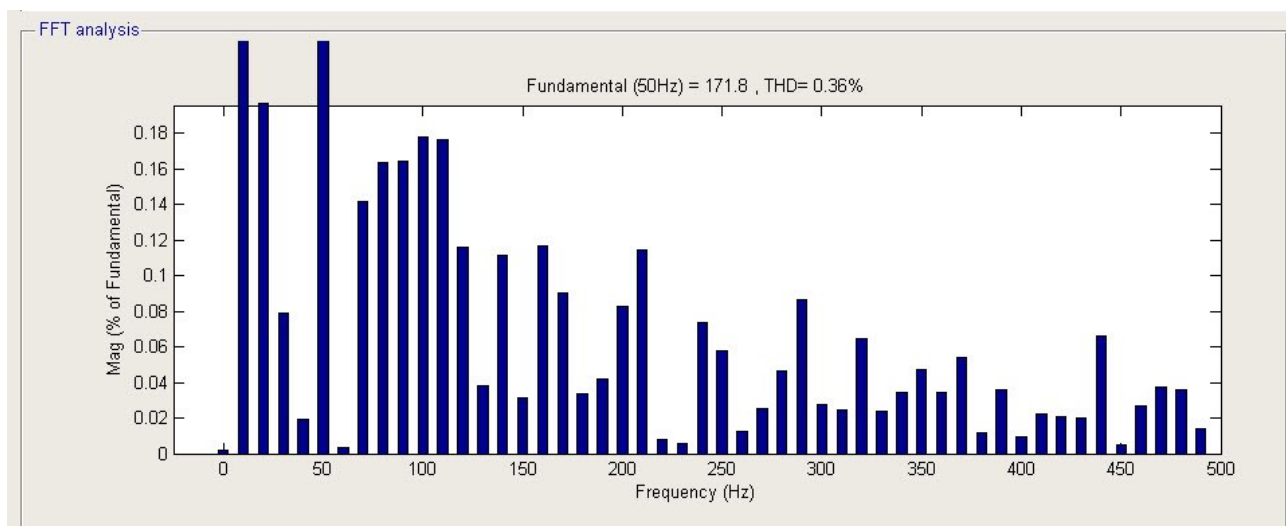


Рисунок 3.10 - вікно FFT аналізу

Завдання для проведення роботи

Завдання 3.1 Побудова моделі напівмостового інвертора струму з RL – навантаженням

Побудувати модель та провести вимірювання струму на навантаженні.

Вихідні дані для моделювання (див. табл. 3.1):

- напруга живлення $U = 400$ В;
- активний опір навантаження $R = 1$ Ом;
- індуктивний опір навантаження $L = 5 \cdot 10^{-3}$ Гн.

Побудова моделі:

Таблиця 3.1 - Блоки та параметри моделі у середовищі MATLAB/Simulink:

Бібліотека	Блок	Параметри
SimPowerSystems/Electrical Source	DC Voltage Source	Amplitude: $200+4 \cdot N$
SimPowerSystems/Power Electronics	Universal Bridge	Див. рис. 12
SimPowerSystems/Elements	Series RLC Branch	Branch type: RL $R = 2+2 \cdot N$ (Ом), $L = (5+N) \cdot 10^{-3}$ (Гн) Measurements: Branch voltage and current
SimPowerSystems/Extra Library/Discrete Control Blocks	Discrete PWM Generator	Див. рис. 13, $T_s=5e-6$
Час моделювання		0,2 с
Вирішувач		ode45

Модель напівмостового інвертора зображено на рис.3.11

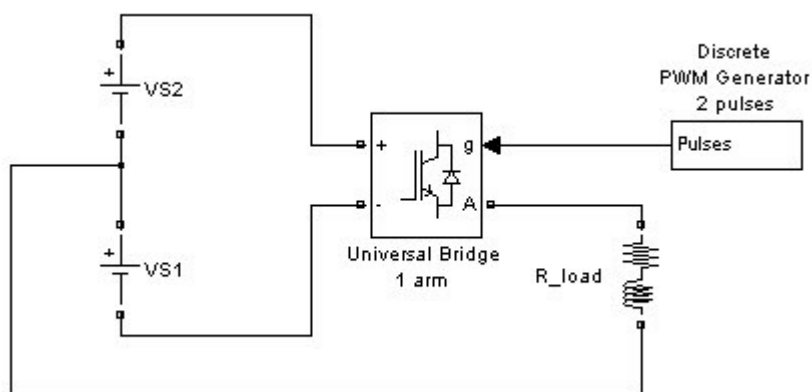


Рисунок 3.11 - Модель напівмостового інвертора струму з RL – навантаженням

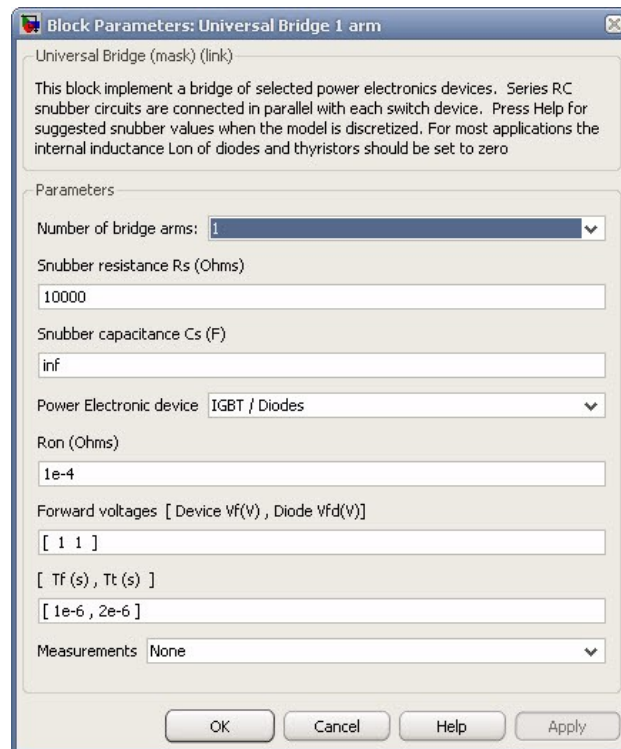


Рисунок 3.12 - Вікно налаштування блоку Universal Bridge

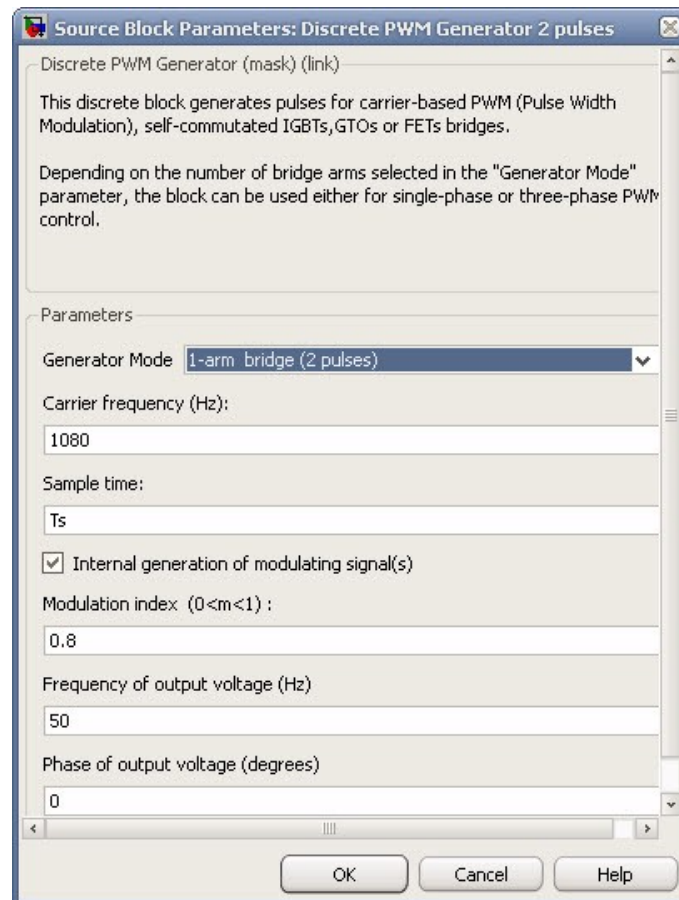


Рисунок 3.13 - Вікно налаштування блоку Discrete PWM Generator

Завдання 3.2 Побудова моделі мостового інвертора струму з RL – навантаженням

Побудувати модель та провести вимірювання струму і напруги на навантаженні.

Вихідні дані для моделювання:

- напруга живлення $U = 400$ В;
- активний опір навантаження $R = 1$ Ом;
- індуктивний опір навантаження $L = 5 \cdot 10^{-3}$ Гн.

Побудова моделі:

Таблиця 3.2- Блоки та параметри моделі у середовищі MATLAB/Simulink:

Бібліотека	Блок	Параметри
SimPowerSystems/Electrical Source	DC Voltage Source	400+4·N
SimPowerSystems/Power Electronics	Universal Bridge	Див. рис. 15
SimPowerSystems/Measurements	Current Measurement	–
SimPowerSystems/Measurements	Voltage Measurement	–
SimPowerSystems/Elements	Series RLC Branch	$R = 2+2 \cdot N$ (Ом), $L = (5+N) \cdot 10^{-3}$ (Гн)
Simulink/Sinks	Scope	–
SimPowerSystems/Elements	Ground	–
SimPowerSystems/Extra Library/Discrete Control Blocks	Discrete PWM Generator	Див. рис. 16
Час моделювання		0,2 с
Вирішувач		ode45

Модель мостового інвертора зображено на рис. 3.14

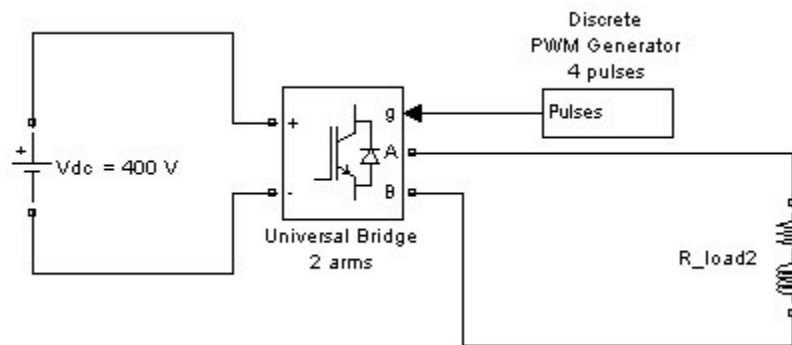


Рисунок 3.14 - Модель мостового інвертора

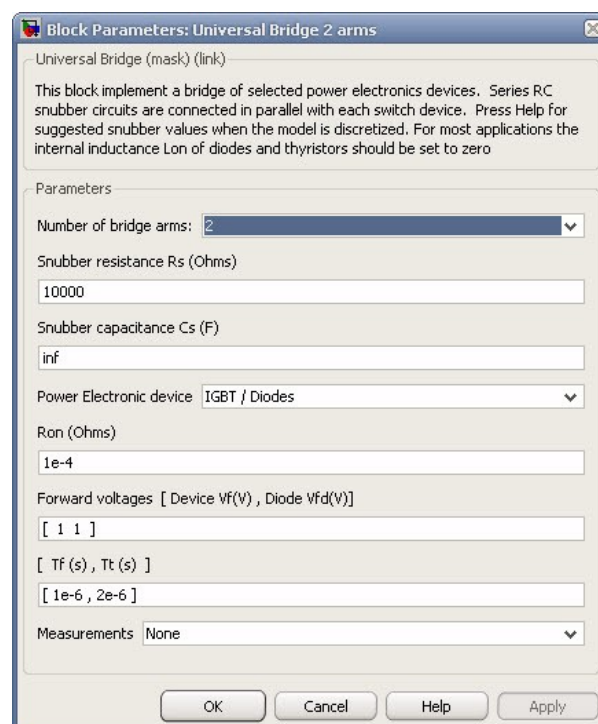


Рисунок 3.15 - Вікно налаштування блока Universal Bridge

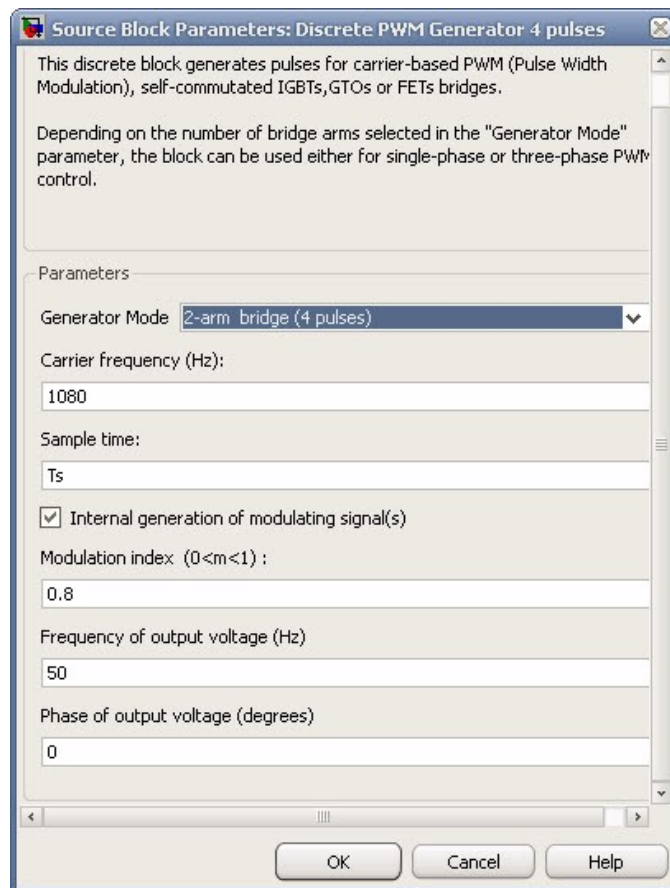


Рисунок 3.16 - Вікно налаштування блоку Discrete PWM Generator

Графіки струму навантаження напівмостового та мостового інверторів струму представлені на рис. 3.17.

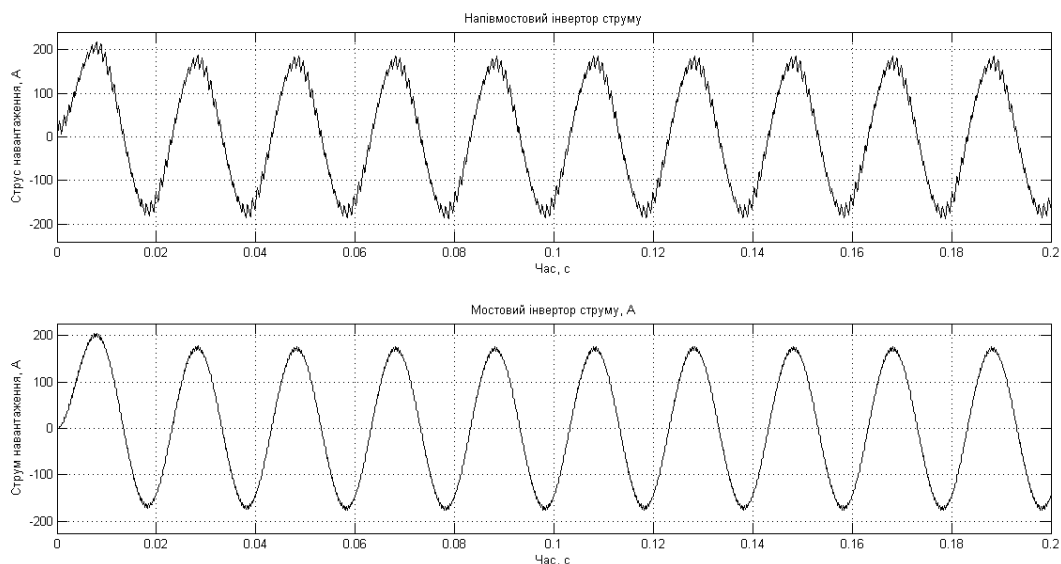


Рисунок 3.17 - Графіки струму навантаження

Гармонічний аналіз необхідно провести для обох варіантів схем інверторів. Результати проведення гармонічного аналізу представлені на рис. 7...10. Необхідно оцінити коефіцієнт THD для обох схем та зробити відповідні висновки.

Контрольні питання та завдання

1. Призначення автономних інверторів.
2. Застосування автономних інверторів.
3. Розкрити суть і пояснити принцип FFT аналізу.
4. Коефіцієнт THD.
5. Назвати та пояснити налаштування основних вимірювальних блоків, які застосовувались у цій роботі.
6. Принцип роботи вимірювальної частини лабораторних схем.

КОМП'ЮТЕРНИЙ ПРАКТИКУМ № 4 «ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК АВТОНОМНОГО ІНВЕРТОРА НАПРУГИ»

Мета роботи - ознайомитися з моделями та режимами роботи автономного інвертора напруги. Дослідити і побудувати квазіусталені та статичні характеристики автономного інвертора напруги.

Основні теоретичні відомості

Напівпровідникові перетворювачі перетворюють електричну енергію з параметрами u_1, f_1 в електричну енергію з параметрами u_2, f_2 під впливом сигналів керування. Крім силових напівпровідникових елементів до складу напівпровідникового перетворювача, як правило, входять й інші елементи, до них, у першу чергу, відносять:

- **реактивні елементи** – конденсатори, котушки індуктивності, дроселі;
- **електромагнітні перетворюючі елементи** – силові та вимірювальні трансформатори;
- **система керування**, яка в загальному випадку є складним електронним пристроєм, реалізованим на елементах інтегральної мікросхеми техніки, або на мікроконтролері;
- **система захисту й сигналізації аварійних режимів**.

Властивості систем силових електроніки вивчаються на основі їх основних характеристик, які можна розділити на статичні, квазіусталені та динамічні.

Квазіусталені характеристики:

- миттєві електромагнітні процеси у навантаженні, у джерелі живлення та силових напівпровідникових елементах в усталеному режимі роботи напівпровідникового перетворювача;
- спектральні характеристики – спектри напруги й струму в ланцюзі живлення й у навантаженні перетворювача.

Статичні характеристики встановлюють зв'язок між середніми, діючими (ефективними) або амплітудними значеннями змінних стану, до них відносять:

- навантажувальні (зовнішні) характеристики, що є залежностями вихідної напруги від струму навантаження;
- електромагнітні характеристики, що представляють собою залежності амплітуди, діючих (середніх) струмів (напруг) у ланцюзі живлення й напівпровідникових елементах перетворювача від струму навантаження;
- енергетичні характеристики – залежності потужності в ланцюзі живлення перетворювача, а також потужності втрат у напівпровідникових елементах перетворювача від потужності в навантаженні.

Час є незалежною змінною у разі моделювання. Тому квазіусталені та перехідні характеристики є результатом моделювання і можуть бути легко отримані в результаті моделювання.

Незалежними змінними під час побудови статичних характеристик є діючі або середні значення змінних стану в усталеному режимі. Тому одержання статичних характеристик вимагає спеціального модельного експерименту, під час якого необхідно змінювати незалежну змінну та визначати необхідні залежності в усталеному режимі.

Розглянемо способи одержання перерахованих характеристик і залежностей на прикладі трифазного автономного інвертора напруги (АІН) з синусоїдальною широтно-імпульсною модуляцією (ШІМ) на несучій частоті.

В теперішній час автономні інвертори все частіше використовуються в електромеханічних системах для керування двигунами змінного струму, системах електроживлення як активні випрямлячі, активні фільтри, компенсатори реактивної потужності та ін. У всіх цих пристроях інвертор з одного боку приєднаний до джерела змінної напруги, а з іншого – до джерела постійної напруги.

Коефіцієнтом модуляції в інверторі називається відношення амплітуди моделюючої напруги до амплітуди пілкоподібної напруги:

$$M = \frac{U_{m\text{мод}}}{U_{m\text{нес}}}. \quad (4.1)$$

У діапазоні зміни коефіцієнта модуляції $0 < m < 1$ інвертор перебуває в лінійній зоні.

У трифазному АІН моделюючи напруги керування ключами кожного плеча інвертора зміщені на 120 градусів. Ці сигнали порівнюються з пилкоподібною несучою напругою та формують сигнали керування кожним плечем. Відповідно до сигналів керування транзисторами формується напруга на кожній фазі навантаження.

Завдання для проведення роботи

Опис моделі

Для одержання основних характеристик інвертора використовуються різні моделі, що відрізняються в основному блоками вимірювання та запису результатів вимірювання в робочий простір MATLAB. Під час цього, сам інвертор, його блок живлення, керування й навантаження залишаються без змін, вони представлені на рис. 4.1. Параметри моделі наведено у табл. 4.1. Блок Subsystem представлено на рис. 4.2. Параметр **Sample time** (якщо заданий) має бути **1e-4**.

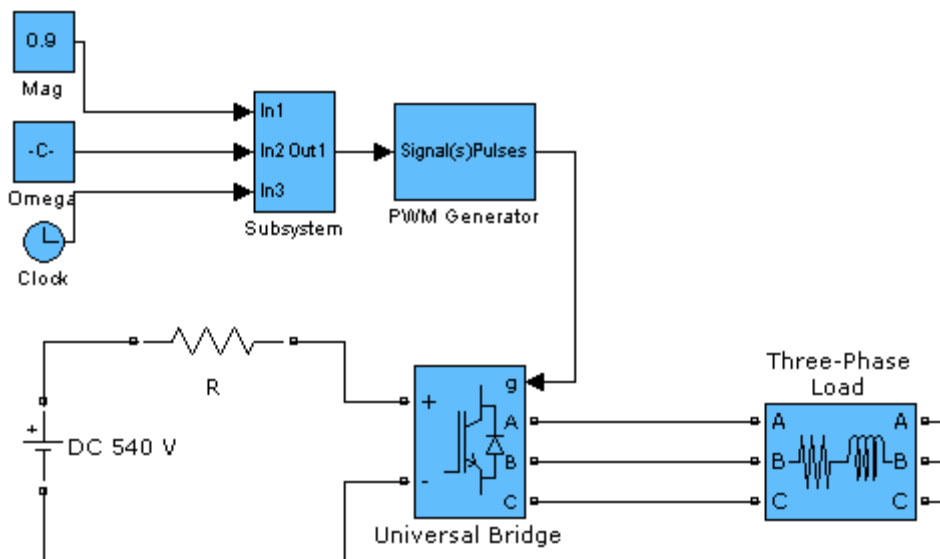
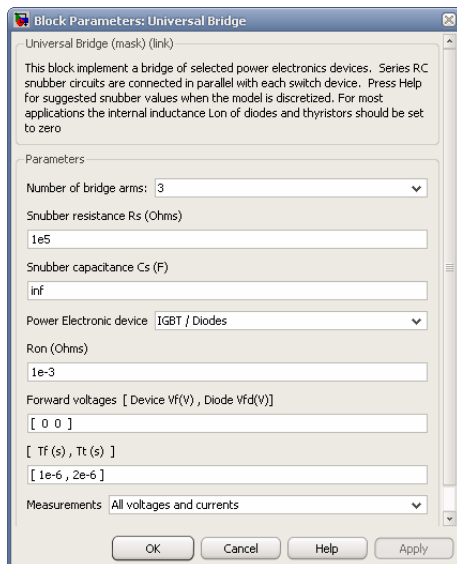


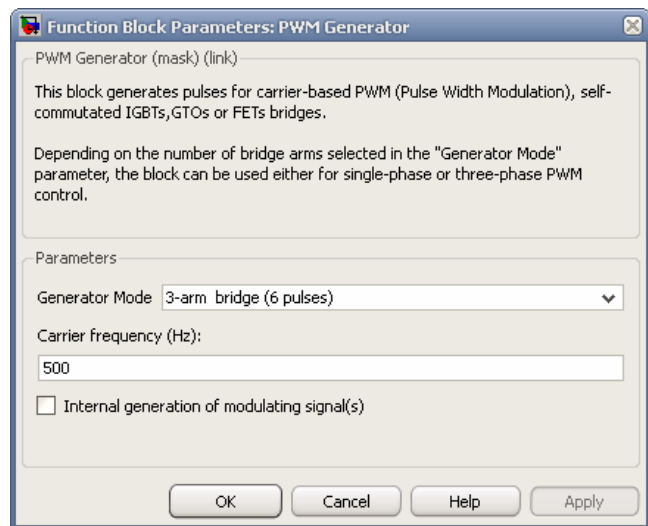
Рисунок 4.1 Модель інвертора

Таблиця 4.1-Блоки та параметри моделі у середовищі MATLAB/Simulink:

Бібліотека	Блок	Параметри
SimPowerSystems/Electrical Source	DC Voltage Source	Amplitude: $500+4 \cdot N$
SimPowerSystems/Power Electronics	Universal Bridge	Див. рис. 2
SimPowerSystems/Elements	Three-Phase Series RLC Branch	Branch type: RL $R = 2+2 \cdot N$ (Ом), $L = (5+N) \cdot 10^{-3}$ (Гн) Measurements: Branch voltage and current
Simulink/Sources	Clock	—
Simulink/Sources	Constant (Mag)	Constant value: 0.9
Simulink/Sources	Constant (Omega)	Constant value: $2 \cdot \pi \cdot 25$
SimPowerSystems/Extra Library/ Control Blocks	PWM Generator	Див. рис. 2б
Час моделювання		0,2 с
Вирішувач		ode45



а



б

Рисунок 4.2 - Вікна настроювання параметрів блоку

Параметри блоків необхідних для побудови підсистеми Subsystem наведено у табл. 4.2.

Таблиця 4.2-Блоки та параметри підсистеми Subsystem:

Бібліотека	Блок	Параметри
Simulink/Signal routing	Mux	Number of inputs: 3
Simulink/User-Defined Functions	Fcn	Відповідно до виразів (4.3)...(4.5) та рис. 4.3

Підсистема утворюється шляхом збирання у модельному вікні схеми (рис. 4.3 а) без вхідних та вихідних портів (In та Out відповідно) та комбінацією клавіш **Ctrl+G**.

Блоки **Fcn**, **Fcn1**, **Fcn2** обчислюють модулюючі сигнали керування транзисторами у плечах *A*, *B*, *C* інвертора відповідно за виразами (4.3)-(4.5):

$$u(1) * \sin(u(2) * u(3)); \quad (4.3)$$

$$u(1) * \sin(u(2) * u(3) - 2 * \pi / 3); \quad (4.4)$$

$$u(1) * \sin(u(2) * u(3) + 2 * \pi / 3). \quad (4.5)$$

На рис. 3 б показано вікно налаштування блока **Fcn**.

Пилкоподібна напруга несучої частоти, що генерується блоком Control System, має амплітуду 1 В. Тому величина сигналу блока Meg дорівнює коефіцієнту модуляції інвертора [див. (1)]. На вхід блока Subsystem (рис. 4.1) подано три сигнали:

- $u(1)$ – амплітуда моделюючої напруги (блок Mag);
- $u(2)$ – кутова частота моделюючої напруги $\omega = 2\pi f$, де $f = 25$ Гц (блок Omega);
- $u(3)$ – поточний час (блок Clock).

У всіх моделях крок дискретизації (Max Step Size = $1e-4$).

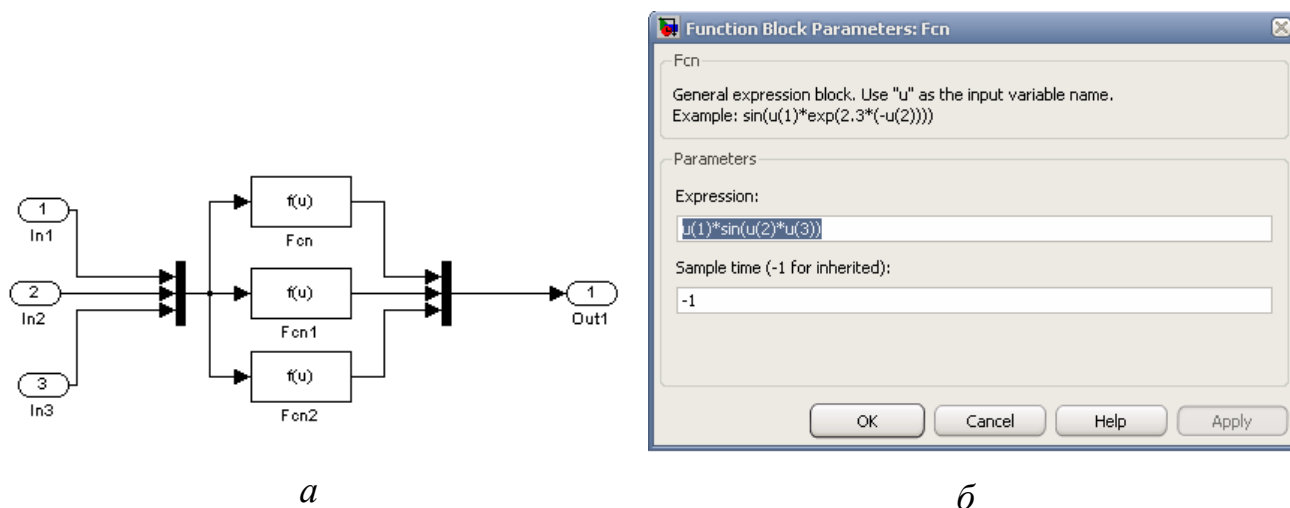


Рисунок 4.3 - Вікно(б) блоку обчислення моделюючого сигналу

Завдання 4.1 Квазіусталені характеристики

Квазіусталені процеси є основою для вивчення фізичних явищ в інверторі для реалізації спектрального аналізу й, зрештою, одержання основних аналітичних співвідношень для розрахунків перерахованих вище статичних характеристик.

Модель для отримання електромагнітних квазіусталених процесів і спектрального аналізу представлена на рис. 4.3 Параметри блоків вимірювання моделі, виділені жовтим кольором, наведено в табл. 4.3. Час моделювання – 0,2 с.

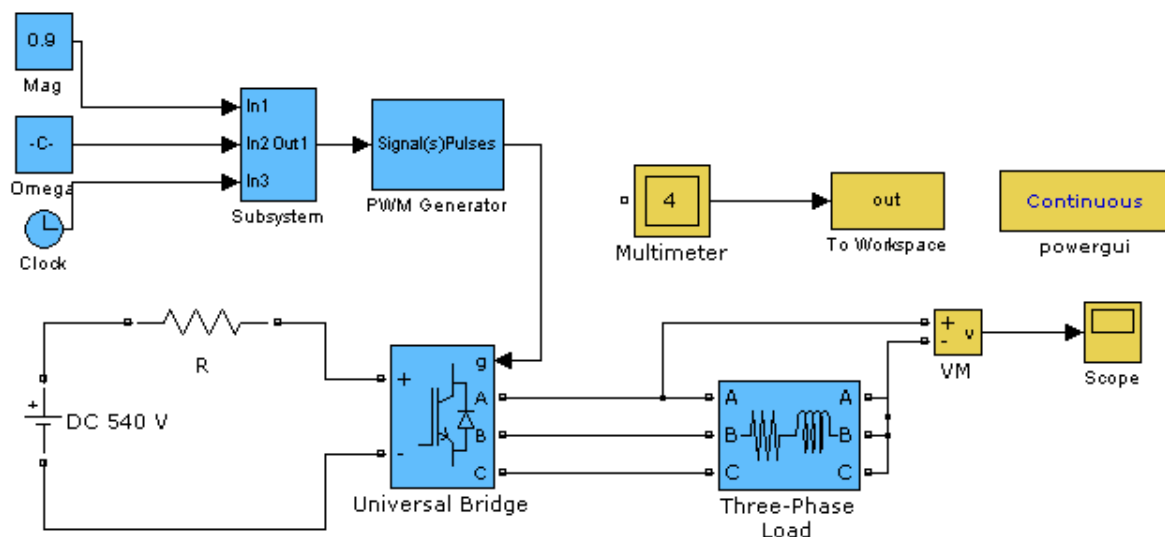


Рисунок 4.3 - Модель для отримання характеристик електромагнітних квазіусталених процесів

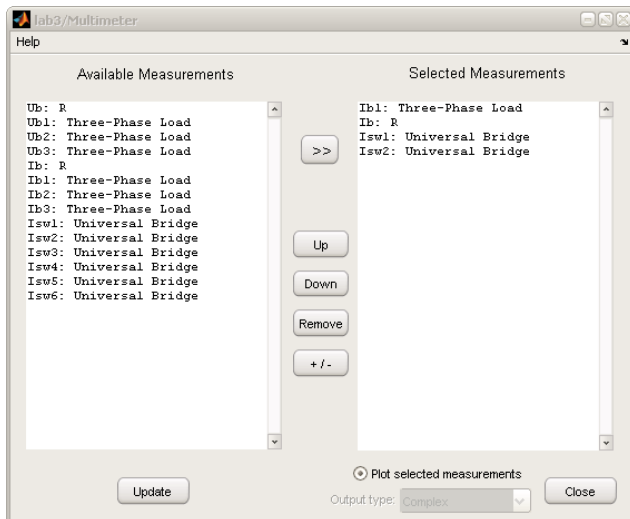
Напругу на фазі *A* навантаження і його спектр, отримані під час налаштування осцилографа за допомогою блока Powergui, представлені на рис. 4.4.

Таблиця 4.3 Параметри блоків виміру:

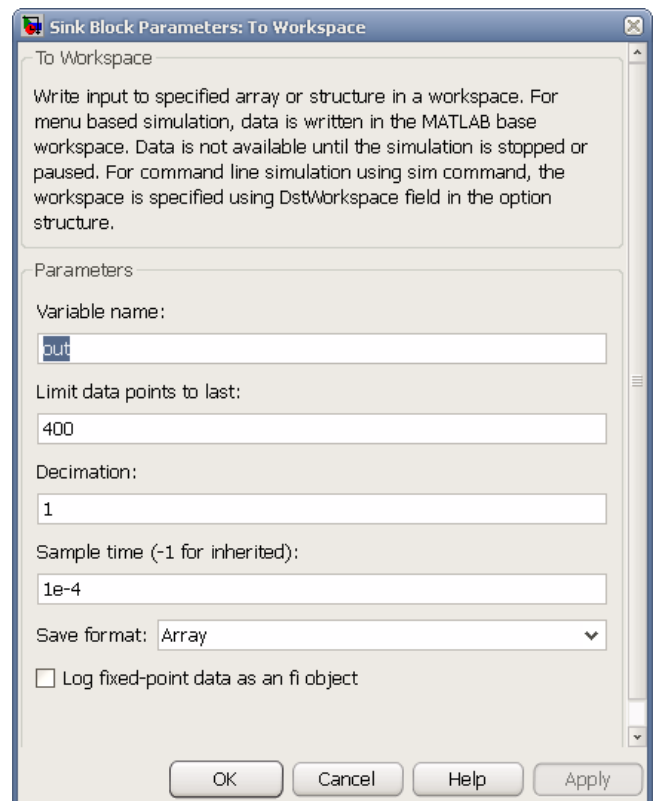
Бібліотека	Блок	Параметри
Simulink/Sinks	Scope	Див. рис. 6
SimPowerSystems/Measurements	Multimeter	Див рис. 5а
SimPowerSystems/Measurements	Voltage Measurement	—
SimPowerSystems/Elements	Series RLC Branch	Branch type: <i>R</i> $R = 0.1$ Measurements: Branch current
Simulink/Sinks	To Workspace	Див. рис. 5б

Ширина імпульсу змінюється за синусоїдальним законом з частотою 25 Гц, коефіцієнт модуляції $m = 0,9$. Опір ($r = 0,1$ Ом), включений в коло джерела живлення, моделює внутрішній опір джерела та дає змогу виміряти струм

джерела блоком Multimeter. Цей блок послідовно вимірює струм навантаження, струм у напівпровідникових ключах $SW1$, $SW2$ плеча A інвертора та струм у ланцюзі живлення.

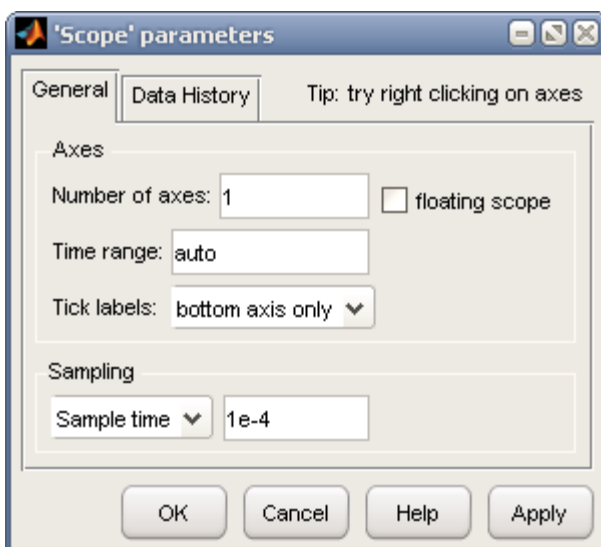


a

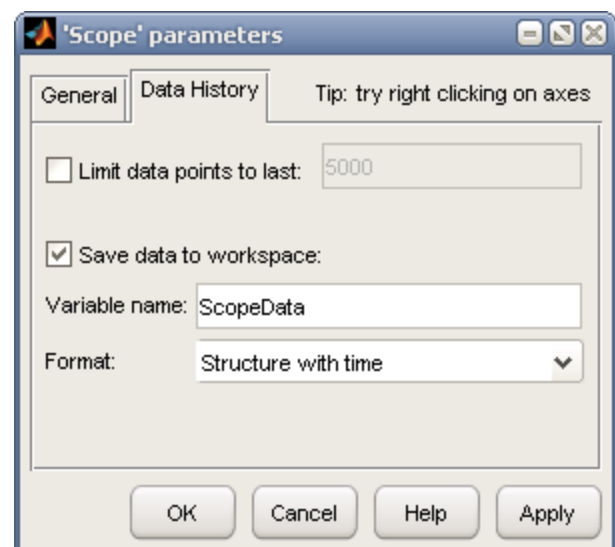


б

Рисунок 4.4 - Вікна налаштування блоків Multimeter (5 *a*) та To Workspace (5 *б*)



a



б

Рисунок 4.5 - Вікна налаштування блока Scope

Гармонічні складові фазної напруги на виході інвертора представлено на рис. 4.6. Відповідні налаштування FFT Analysis представлено на рис. 4.7.

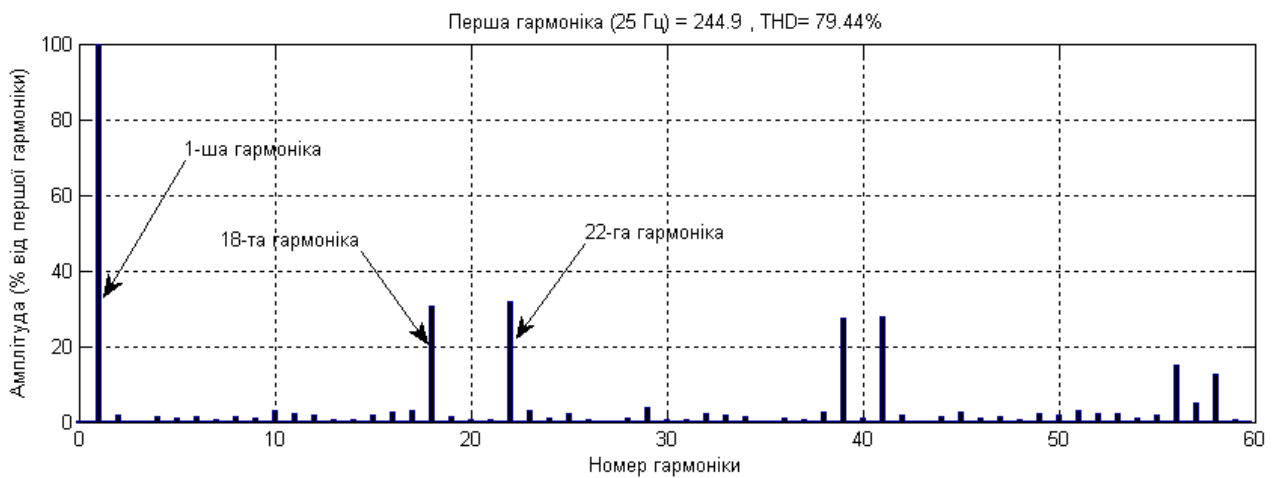


Рисунок 4.6 - Гармонічні складові фазної напруги на виході інвертора

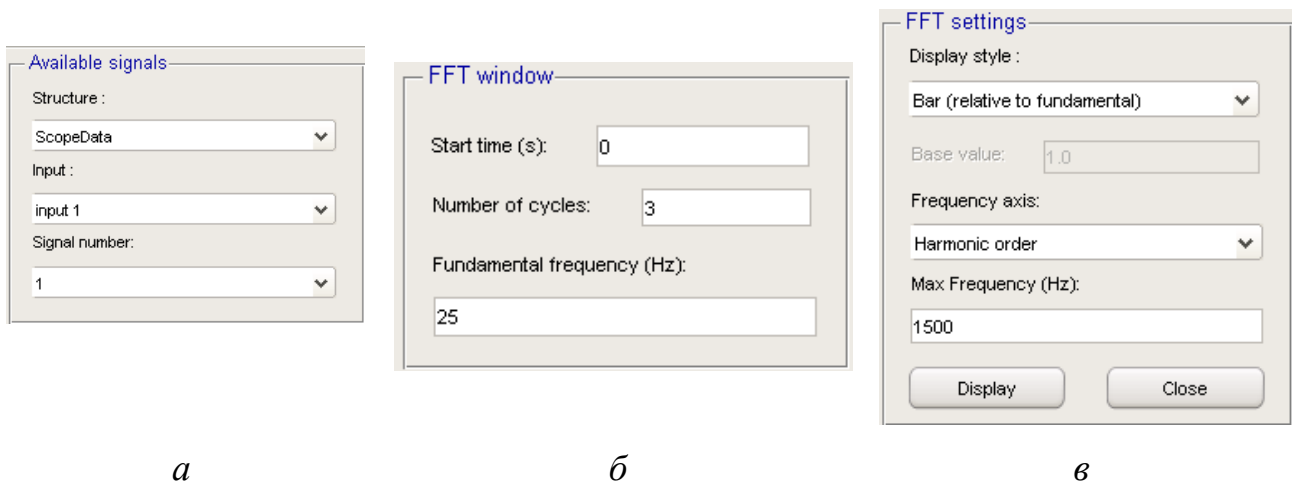


Рисунок 4.7 - Вікна налаштування FFT Analysis

З рис. 4.6 випливає, що спектр напруги містить основну частоту модуляції (25 Гц) і бокові частоти, що розташовуються праворуч і ліворуч від гармонік, кратних відношенню несучої частоти (500 Гц у нашому випадку) до частоти модуляції.

Результати моделювання записуються в робочий простір блоком To Workspace, квазіусталені струми будуються під час виконання програми, представленої в лістингу 1.

Лістинг 1

```
t=0:1e-4:399*1e-4; % Задаємо час
i_Load=out(:,1); % Створюємо змінну струму навантаження
i_dc=out(:,2);    % Створюємо змінну струму живлення
i_SW1=out(:,3); % Створюємо змінну струму SW1
i_SW2=out(:,4); %Створюємо змінну струму SW2
%Побудова графіків струму навантаження та живлення
Subplot (2,1,1);
Plot (t,i_Load, t,i_dc);
Ylabel ('Струм, A');
Xlabel ('Час, c');
grid on;
legend ('Струм фази A навантаження, A','Струм кола генератора, A',
'Location', 'Best');
%Побудова графіків струму в напівпровідникових ключах
Subplot (2,1,2);
Plot (t,i_SW1,t,i_SW2);
Ylabel ('Струм, A');
Xlabel ('Час, c');
grid on;
legend('Струм через SW1, A','Струм через SW2, A', 'Location', 'Best');
```

Для створення програми, код якої відображено у лістингу 1, необхідно у робочому вікні Matlab ввести **edit list1**, програма видасть запит на створення файлу з іменем **list1**, після чого відкриється вікно **Editor**, в яке необхідно вставити код з лістингу 1. Виконання програми призводить до побудови графіків квазіусталених процесів, показаних на рис. 1.6.

З розгляду електромагнітних процесів випливає, що струм навантаження дорівнює алгебраїчній сумі струмів ключів *SW1*, *SW2*. Під час цього на

напівперіоді, коли модулююча напруга позитивна, струм тече через $VT1$, а у разі його запирання внаслідок наявності індуктивності в навантаженні струм перемикається на діод $D2$. Аналогічно під час негативної модулюючої напруги струм проводять $VT2$ і $D1$. Струм навантаження містить першу гармоніку і пульсуючу складову, величина якої залежить від частоти несучого пилкоподібного сигналу та постійної часу навантаження. Амплітуда першої гармоніки визначається з виразу

$$I_m(1) = \frac{U_m(1)}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}}, \quad (4.6)$$

де $U_m(1)$, $I_m(1)$ – амплітудні значення перших гармонік фазної напруги та струму навантаження.

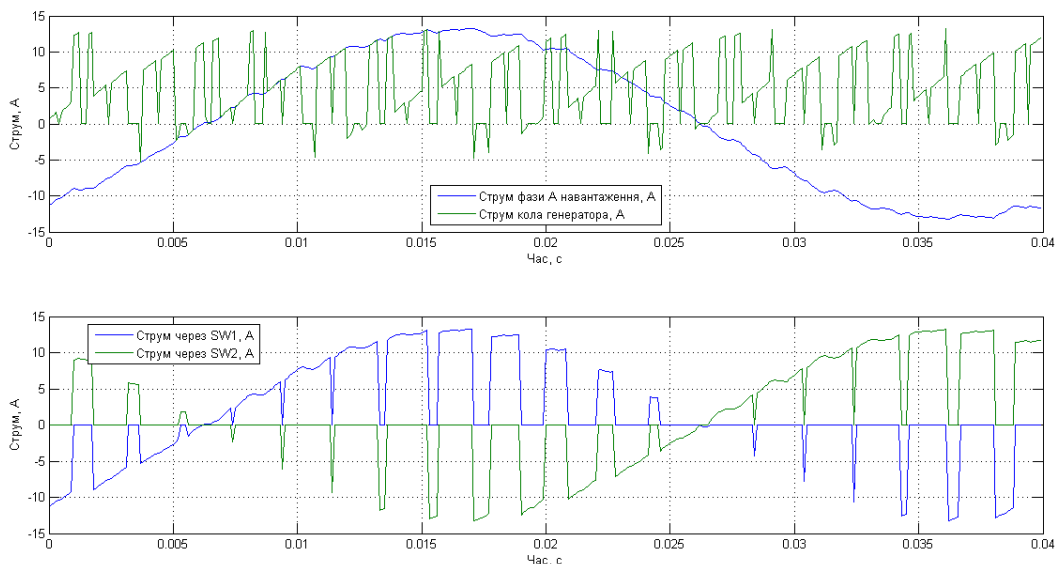


Рисунок 4.8- Графіки квазіусталених процесів у автономному інверторі напруги

Амплітуду пульсуючої складової можна визначити за наближеною формулою, урахувавши у разі цього, що вона визначається гармоніками, які розташовані ближче всіх до першої. У даному випадку – це 18-та і 22-га гармоніки. Оскільки амплітуди гармонічних напруг на цих гармоніках приблизно рівні, то маємо

$$\Delta I_m = \sqrt{\left(\frac{U_m}{\sqrt{R^2 + (18\omega L)^2}}\right)^2 + \left(\frac{U_m(22)}{\sqrt{R^2 + (22\omega L)^2}}\right)^2} + \frac{\sqrt{2}U_m(18)}{\sqrt{R^2 + (18\omega L)^2}} = I_m \sqrt{2}. \quad (4.7)$$

де $U_m(18)$ $U_m(22)$ – амплітуда напруги на 18-й і 22-й гармоніках.

Під час розрахунків втрат у напівпровідникових елементах інвертора слід мати на увазі, що конструктивно інвертор (або, принаймні, плече інвертора), як правило, являє собою інтегрально модульну конструкцію, у якій теплові втрати розподіляються рівномірно. Тому такі втрати слід розраховувати на все плече. Оскільки пряме спадання напруги й прямий опір відкритого транзистора й діода практично однакові, то втрати в плечі інвертора у квазіусталеному режимі можна розрахувати за формулою

$$\begin{aligned} P_{SW} &= \frac{R_{on}(I_m^2(1) + \Delta I_m^2)}{2} + \frac{2U_f I_m(1)}{\pi} = \\ &= R_{on}(I^2(1) + I_m^2(18)) + \frac{2U_f I_m(1)}{\pi}. \end{aligned} \quad (4.8)$$

де P_{SW} – потужність втрат у плечі інвертора; R_{on} – опір відкритого напівпровідникового ключа; U_f – падіння напруги на відкритому ключі;

$I(1) = \frac{I_m(1)}{\sqrt{2}}$ – діючий струм першої гармоніки.

Повна та активна потужності у навантаженні визначаються за виразами

$$\begin{aligned} S_{load} &= \frac{3U_m(1)I_m(1)}{2}; \\ P_{load} &= \frac{3U_m(1)I_m(1)}{2} \cos \varphi. \end{aligned} \quad (4.9)$$

Потужність джерела живлення

$$S_{source} = U_{dc} I_{dc}. \quad (4.10)$$

Завдання 4.2. Статичні характеристики трифазного інвертора

Статичні характеристики інвертора можна одержати різними способами. Розглянемо три з них, у яких використовуються програмні засоби MATLAB і

зв'язок MATLAB з MS Office. Кожний зі способів розглядається на конкретному прикладі одержання певної статичної характеристики.

2.1. Розрахунок та побудова регулювальної характеристики

Одержання регулювальної характеристики здійснюється на моделі, представлений на рис. 10. Параметри блоків вимірювання амплітуди першої гармоніки вихідної напруги наведено в табл. 4.

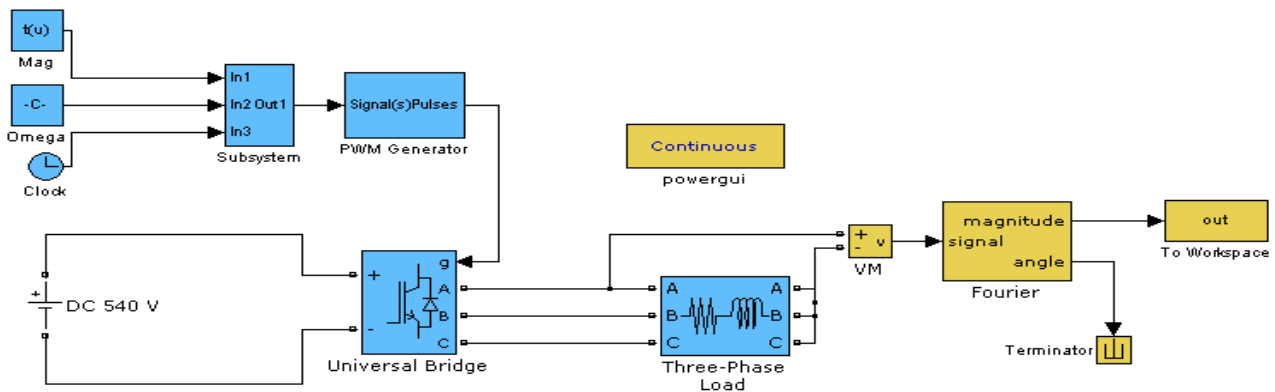


Рисунок 4.9 - Модель для отримання регулювальної характеристики

Таблиця 4.4-Параметри блоків вимірювання:

Бібліотека	Блок	Параметри
Simulink/Sinks	To Workspace	Variable name: out; Limit data to last: 1; Sample time: 1e-4.
SimPowerSystems/Extra library/Measurements	Fourier	Fundamental frequency: 25; Harmonic n: 1.
SimPowerSystems/Measurements	Voltage Measurement	—
Simulink/Sinks	Terminator	—

Регулювальну характеристику можна одержати шляхом виконання програми лістингу 2 (аналогічно операціям з лістингом 1).

Лістинг 2

```
clear all;
```



```

t=0:0.1:2; %Задаємо час
%Відкриваємо файл lab3_2.mdl, який містить модель для побудови
%регулювальної характеристики АІН
open('lab3_2.mdl');
for u=1:21,
    set_param('lab3_2/Mag','Value','t(u)');%Встановлюємо параметри блока Mag
    sim('lab3_2'); %Запускаємо модель на виконання
    f(u)=out;%Створюємо масив, у який записуються значення вихідної змінної
out
end
%Виконуємо побудову регулювальної характеристики АІН
plot(t,f);
title('Регулювальна характеристика АІН')
ylabel('Вихідна напруга, В');
xlabel('Вхідна напруга, В');
grid on;

```

За результатами роботи програми лістингу 2 будується регулювальна характеристика (рис. 4.9).

З рис. 8 видно, що інвертор є лінійною ланкою в діапазоні зміни коефіцієнта модуляції $0 < m < 1$. При $m > 1$ регулювальна характеристика стає нелінійною. За регулювальною характеристикою визначається коефіцієнт підсилення інвертора як ланки в системі регулювання.

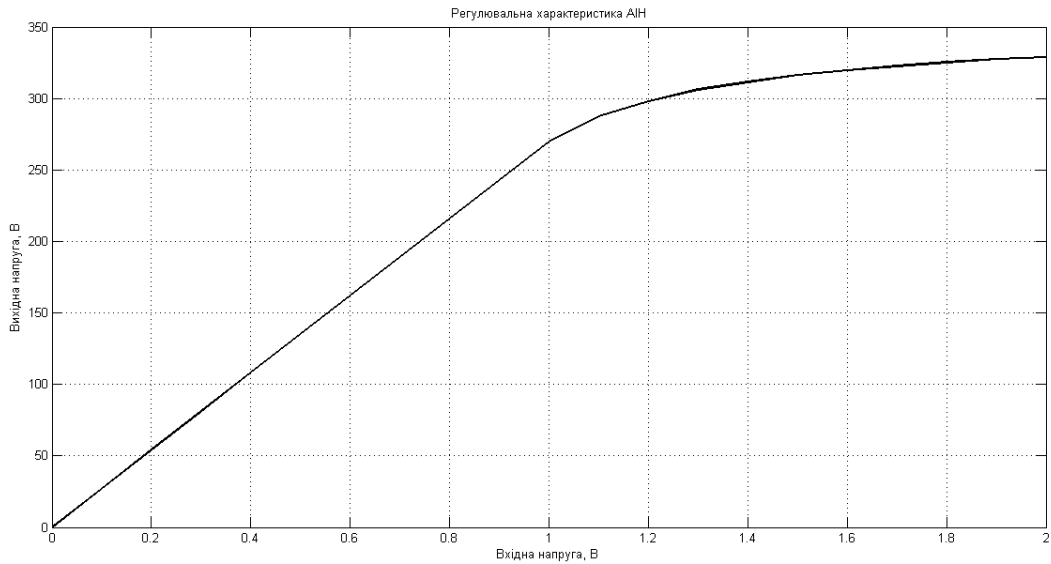


Рисунок 4.9 - Регулювальна характеристика АІН

Контрольні питання та завдання

1. Призначення автономного інвертора.
2. Складові елементи напівпровідникових перетворювачів.
3. Квазіусталені характеристики АІН.
4. Статичні характеристики АІН.
5. Визначення і призначення коефіцієнта модуляції в інверторі.
6. Призначення та функція основних елементів модельних схем.
7. Принцип дії основних схем лабораторної роботи.
8. Призначення основних елементів робочих схем лабораторної роботи.

КОМП'ЮТЕРНИЙ ПРАКТИКУМ № 5 «ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК АУТОНОМНОГО ІНВЕРТОРА НАПРУГИ, РОЗРАХУНОК ТА ПОБУДОВА ЗОВНІШНЬОЇ (НАВАНТАЖУВАЛЬНОЇ), ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ТА ЕНЕРГЕТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ІНВЕРТОРА»

Мета роботи: ознайомитися з моделями та режимами роботи автономного інвертора напруги. Дослідити і побудувати зовнішню (навантажувальну), електромагнітну та енергетичні характеристики автономного інвертора напруги.

Завдання 5.1 Розрахунок та побудова зовнішньої (навантажувальної), електромагнітних та енергетичних характеристик інвертора

У розглянутому модельному експерименті (К.П. № 3) струм навантаження протягом часу моделювання змінюється за рахунок зміни проти ЕДС з такою швидкістю, під час якої можна нехтувати падінням напруги на індуктивності навантаження:

$$L \frac{di}{dt} \ll R \quad (5.1)$$

Модель трифазного інвертора зі змінним навантаженням.

Час моделювання – 1,0 с, крок дискретизації (Max Step Size = 1e-4), коефіцієнт модуляції $m = 0,9$.

Блоком Multimeter послідовно вимірюються значення струму навантаження, напруги навантаження та струму в колі живлення інвертора.

Програмоване джерело, вікно налаштування якого показано на рис.5.1, призначене для зміни навантаження інвертора протягом часу моделювання.

Вимірювальна частина моделі містить чотири блоки. Зміст блока Subsystem показано на рис.5.2. У ньому послідовно визначаються:

- амплітуда першої гармоніки струму навантаження (блок Fourier);
- фаза першої гармоніки струму навантаження (блок Fourier);

- амплітуда першої гармоніки лінійної напруги навантаження (блок Fourier 1);
- середній струм живлення інвертора (блок Fourier 2);
- ефективний струм у напівпровідниковому плечі інвертора (блок RMS);
- миттєві струм і напруга навантаження.

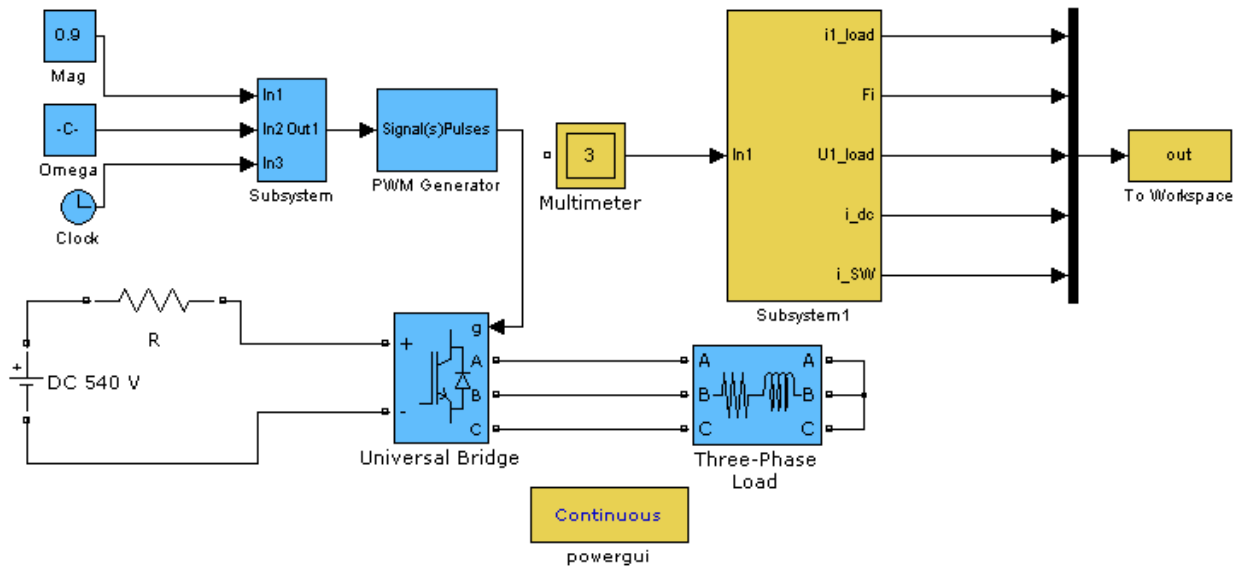


Рисунок 5.1- Модель трифазного інвертора зі змінним навантаженням

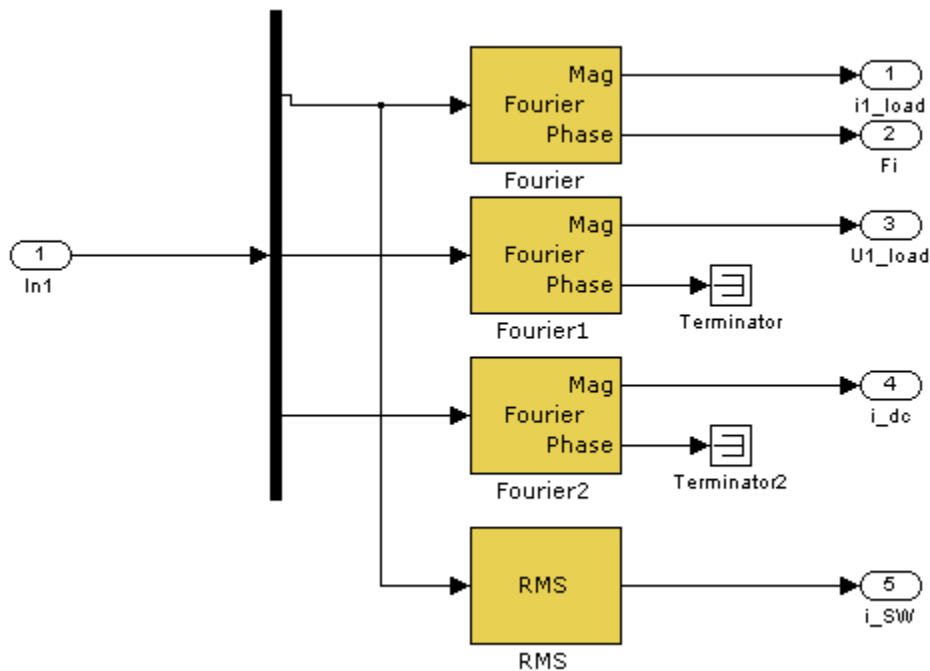


Рисунок 5.2 - Вимірювальна частина моделі

Блок To Workspace служить для запису в робочий простір MATLAB величин, вимірюваних блоком Subsystem. При виставленому прапорці у полі Limit data points to last (максимальна кількість записаних вимірювань) у робочий простір записується число проставлених у поле кінцевих вимірювань (початкові вимірювання видаляються). Під час цього час запису дорівнює добутку числа вимірювань на максимальний крок дискретизації. У нашому випадку $t = 8000 \cdot 10^{-4} = 0,8$ с. Таке допущення дає змогу виключити дані перехідного процесу в схемі.

Параметри блоків для побудови моделей (рис.4.1 та 4.2 К.П. № 4) наведено у табл. 5.1.

Таблиця 5.1-Параметри блоків:

Бібліотека	Блок	Параметри
Simulink/Sinks	To Workspace	Variable name: out; Limit data to last: 1; Decimation: 1; Sample time: 1e-4. Array
SimPowerSystems/Extra library/Discrete Measurements	Discrete Fourier	Fundamental frequency: 25; Harmonic n: 1.
SimPowerSystems/Extra library/Measurements	RMS	Fundamental frequency: 25;
SimPowerSystems/Measurements	Multimeter	Струм навантаження(R); напруга навантаження(R); Струм (Ib1 Three-

		Phase Load).
SimPowerSystems/Elements	Three-Phase Series RLC Branch	Branch type: RL $R = R1$ (Ом), $L = L1$ (Гн) Measurements: Branch voltage and current
Simulink/Sinks	Terminator	—
Час моделювання		0,2 с
Вирішувач		ode45

Для побудови статичних характеристик служить програма, представлена в лістингу 1. Навантажувальна й електромагнітні характеристики, розраховані та побудовані програмою, показані на рис.5.3.

Програма, представлена лістингом 4, розраховує також потужність у навантаженні та у ланцюзі живлення, що дає змогу побудувати енергетичні характеристики інвертора. Для виконання її відповідно до номера варіанту в лістингу прийняти $R1=10+2 \cdot N$; $L1=(5+2 \cdot N) \cdot 10^{-3}$.

Лістинг 4

```
clear all;
%Відкриваємо файл lab4_1.mdl
open('lab4_1.mdl');
R1=20;
L1=0.1;
for u=1:10,
    R1=R1-1;
    sim('lab4_1'); %Запускаємо модель на виконання
    for m=1:5;
        f(u,m)=out(m);%Створюємо масив, в який записуються значення
        вихідної змінної out
```

```

    end
end
for k=1:10
I1_Load(k)=f(k,1); %Амплітуда 1-ї гармоніки струму навантаження
Fi(k)=f(k,2);%Фаза струму навантаження
U1_Load(k)=f(k,3);%Амплітуда 1-ї гармоніки лінійної напруги
навантаження
I_dc(k)=f(k,4);%Середнє значення струму джерела живлення
I_SW(k)=f(k,5);%Діюче значення струму в плечі інвертора
I0_SW(k)=2*I1_Load(k)/pi; %Середнє значення струму в плечі інвертора
end
P_dc=540.*I_dc;%Потужність джерела живлення
S_Load=(sqrt(3)*U1_Load.*I1_Load)/2;%Повна потужність навантаження
P_Load=S_Load.*cos(0-Fi*pi/180);%Активна потужність навантаження
subplot(2,1,1);
plot(I1_Load, U1_Load);
title('Навантажувальна характеристика');
ylabel('Напруга навантаження (фаза A), В');
xlabel('Струм навантаження (фаза A), А');
grid on;
%Побудова графіків струму в напівпровідникових ключах
subplot(2,1,2);
plot(I1_Load,I_dc,I1_Load,I_SW,I1_Load,I0_SW);
ylabel('Струм, А');
xlabel('Струм навантаження (фаза A), А');
grid on;
legend('Струм кола генератора, А','Струм плеча інвертора, А','Середнє
значення струму плеча інвертора, А', 'Location', 'Best');
%Побудова графіків струму в напівпровідникових ключах
figure;

```

```

subplot(2,1,1);
plot(P_load,P_dc);
title('Енергетична характеристика інвертора');
ylabel('Потужність кола живлення, Вт');
xlabel('Активна потужність навантаження, Вт');
grid on;
subplot(2,1,2);
plot(S_Load,P_dc);
title('Енергетична характеристика інвертора');
ylabel('Потужність кола живлення, Вт');
xlabel('Потужність навантаження, ВА');
grid on;

```

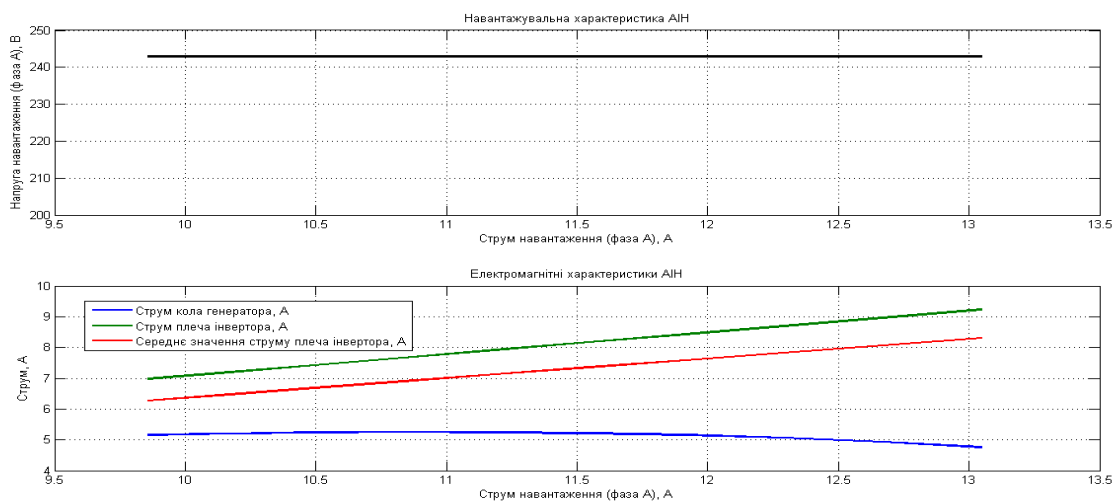


Рисунок 5.3 - Навантажувальна й електромагнітні характеристики

Завдання 5.2 Динамічні характеристики трифазного інвертора

До динамічних характеристик відносять:

- перехідні електромагнітні процеси в навантаженні та джерелі живлення при стрибкоподібній зміні величини вхідного сигналу;
- перехідні електромагнітні процеси в навантаженні при стрибкоподібній зміні параметрів джерела живлення;

- перехідні електромагнітні процеси в джерелі живлення при стрибкоподібній зміні параметрів навантаження;
- перехідні електромагнітні процеси в напівпровідникових елементах перетворювача при їхньому перемиканні.

Автономний інвертор напруги в системі регулювання є нелінійною ланкою з дискретно змінними параметрами. Ця не лінійність проявляється в тому, що запізнювання вихідної напруги в перехідному процесі щодо вхідного сигналу залежить від моменту зміни вхідного сигналу щодо пилоподібної несучої напруги та від величини зміни вхідного сигналу. Частота несучої пилоподібної напруги в сучасних системах значно перевищує смугу пропускання системи. Тому найчастіше АІН розглядається як без інерційна ланка. Якщо вихідна величина розглядається як діючий струм навантаження, то динаміка АІН визначається динамічними властивостями навантаження. Іноді інвертор замінюється лінійною аперіодичною ланкою, постійна часу якого приймається рівною періоду несучої пилоподібної напруги.

Моделі дослідження динаміки інвертора дає змогу побудувати функціональну модель, що відображає фізику його роботи. Вона будується в обертовій системі координат з використанням методу результуючого вектора. Під час цього зміну стану в моделі результати відповідають їхнім амплітудним значенням. Така модель зображена на рис. 5.4.

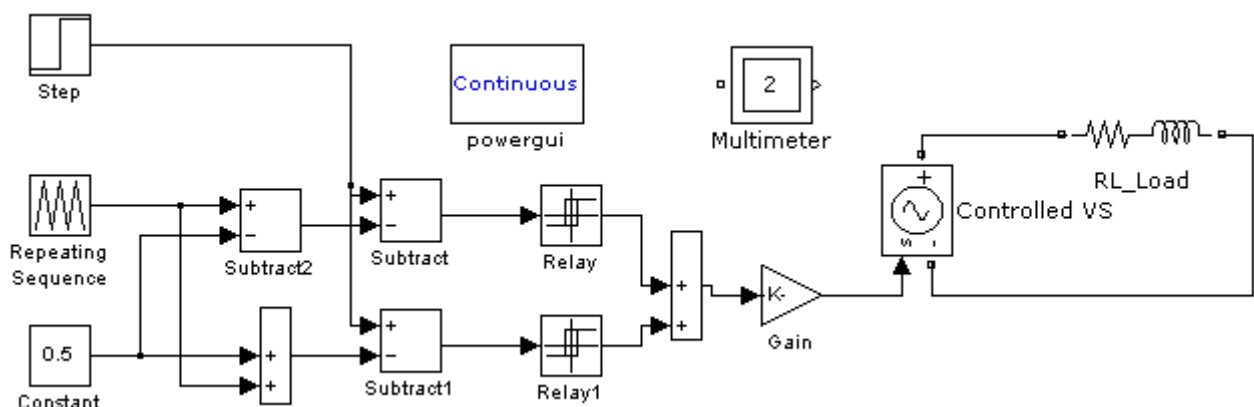


Рисунок 5.4 - Модель для дослідження динамічних характеристик

Функціональна модель інвертора реалізована з використанням блоків основної бібліотеки Simulink. Активно-індуктивне навантаження інвертора реалізоване з використанням блоків бібліотеки SimPowerSystem. Параметри блоків, що не ввійшли в попередні моделі, занесені до табл. 1. Час моделювання 0,08 с, крок дискретизації $1e-4$. Перехідний процес у моделі показано на рис. 5.5.

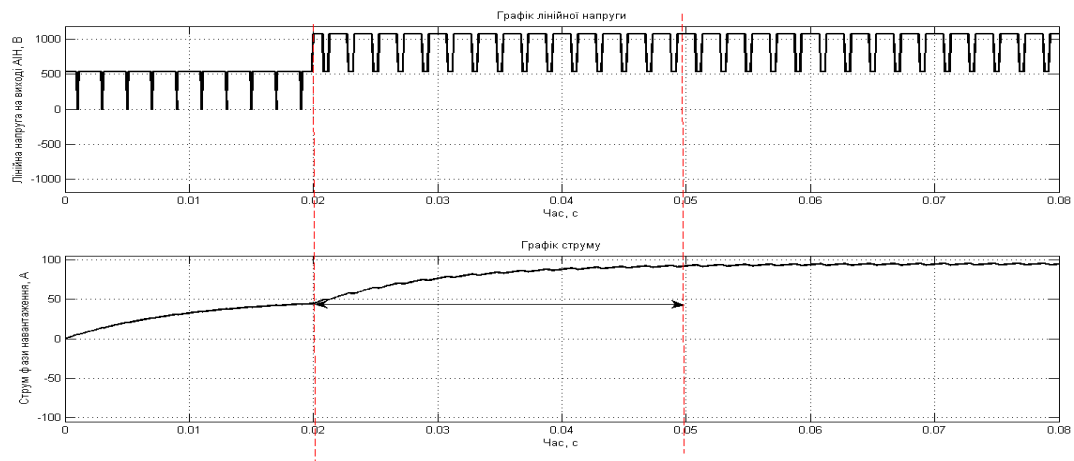


Рисунок 5.5 - Графік перехідного процесу

На верхній осцилограмі представлена лінійна напруга на виході АІН під час стрибку вхідного сигналу, на нижній – струм у фазі навантаження. Затримка реакції напруги тут становить величину 2,5 мс, і практично не впливає на характер перехідного процесу за струмом, що підтверджує можливість представлення інвертора без інерційною ланкою.

Параметри блоків для побудови табл. 5.2

Таблиця 5.2-Параметри блоків:

Бібліотека	Блок	Параметри
Simulink/Source	Step	Step time: 0.02; Initial value: 0; Output: 0.8; Sample time: $1e-4$.
Simulink/Source	Repeating Sequence	Time values: 0 $1e-3$ $1e-3$ $2e-3$; Output values: - 0.5 0.5 0.5 - 0.5

Simulink/Source	Constant	Constant value: 0.5
Simulink/Math Operation	Sum	-, Sample time: 1e-4.
Simulink/Math Operation	Subtract	-, Sample time: 1e-4.
Simulink/Math Operation	Gain	Gain 540; Sample time 1e-4.
Simulink/Discontinuities	Relay 1, 2	Switch on point: 0.001; Switch off point: 0.001; Output when on 1; Output when off:0; Sample time: 1e-4;
SimPowerSystem/Electrical Sources	Controlled Voltage Source	Source type DC, Initial amplitude 0
Час моделювання		0,08 с
Вирішувач		ode45

Блок Universal bridge не дає змоги промодельовати перехідні процеси при перемиканні напівпровідникових ключів інвертора, тому що в його параметрах враховується тільки час запізнювання при вимиканні.

Контрольні питання та завдання

1. Основні статичні характеристики інвертора.
2. Основні динамічні характеристики інвертора.
3. Принцип роботи моделі, яка використовувалась в роботі для дослідження статичних характеристик.
4. Призначення елементів моделі, яка використовувалась в роботі для дослідження статичних характеристик.
5. Принцип роботи моделі, яка використовувалась в роботі для дослідження динамічних характеристик.
6. Призначення елементів моделі, яка використовувалась в роботі для дослідження динамічних характеристик.

ТЕМА 4: РЕГУЛЯТОРИ ПОСТІЙНОЇ НАПРУГИ

КОМП'ЮТЕРНИЙ ПРАКТИКУМ № 6 «ДОСЛІДЖЕННЯ ІМПУЛЬСНОГО ПОНИЖУЮЧОГО РЕГУЛЯТОРА ПОСТІЙНОЇ НАПРУГИ»

Мета роботи: побудувати модель та провести моделювання заданої схеми системи. Побудувати та дослідити характеристики системи.

Основні теоретичні відомості

У технічних пристроях зустрічається безліч первинних джерел електроенергії, які виробляють її у вигляді постійної напруги. До них відносять сонячні батареї, що працюють на основі фотоефекту, термоелектрогенератори і магнітогідродинамічні (МГД) генератори, паливні елементи, які використовують енергію хімічних реакцій, акумулятори, як джерела запасеної електроенергії, електромашинні генератори постійної напруги та ін. Для приведення постійних напруг цих джерел до необхідного рівня, його стабілізації або (і) регулювання потрібні перетворювачі постійної напруги в постійну. Потужність таких перетворювачів може досягати десятків і навіть сотень кіловат. Уразі таких потужностей доцільно застосовувати одно-каскадні перетворювачі.

У цій роботі розглянуто базові схеми перетворювачів, що здійснюють прямі (одно-каскадні) перетворення постійної напруги в постійну без використання будь-якого проміжного перетворення, наприклад постійної напруги в змінну з подальшим перетворенням змінної напруги в постійну. Вивчення і дослідження цих перетворювачів здійснюється з використанням віртуальних лабораторних установок. Вони дають змогу отримувати основні характеристики розглянутих перетворювачів двома способами:

- «звичайним», змінюючи обраний параметр і реєструючи значення досліджуваних величин під час кожної симуляції з наступною побудовою необхідних характеристик;
- програмним, в якому зняття та побудова основних характеристик відбувається автоматично.

Схема імпульсного знижувального регулятора постійної напруги показана на рис. 6.1 а. розрахункові схеми заміщення регулятора на комутаційних інтервалах представлені на рис. 6.1 б, в. Під час періоду несучої частоти (T) послідовно утворюються два комутаційних інтервали.

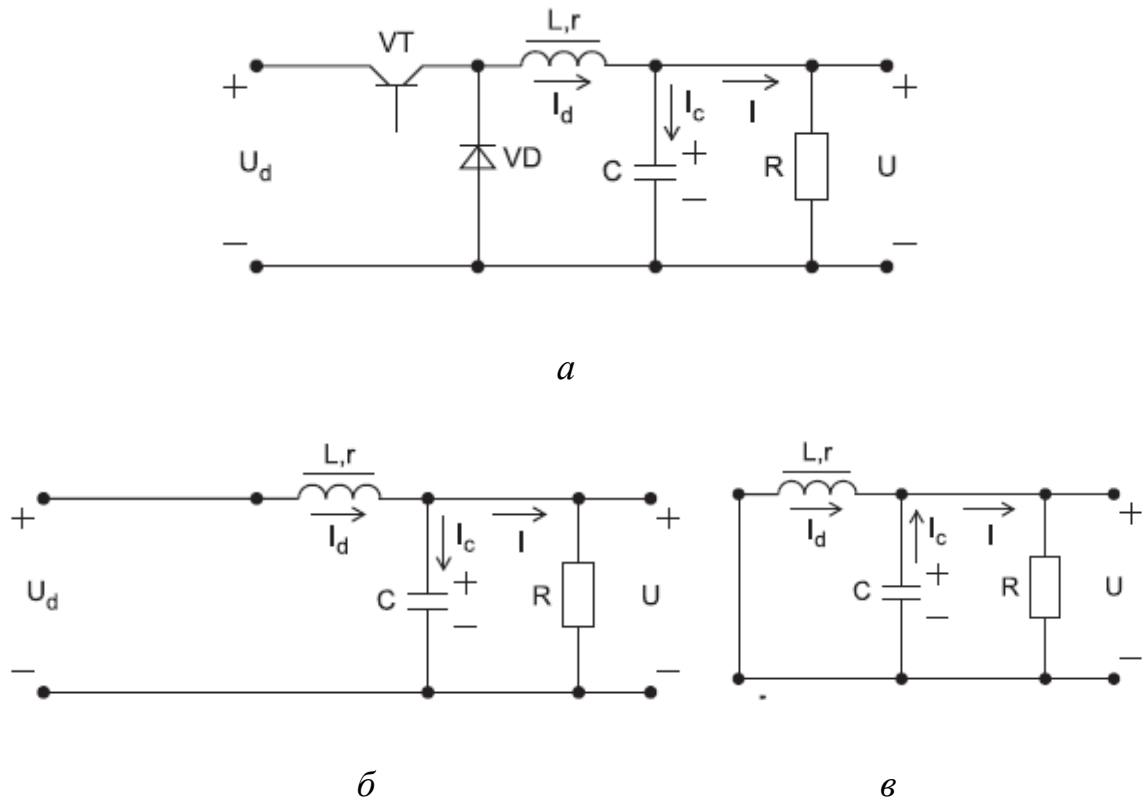


Рисунок 6.1- Розрахункова схема знижувального регулятора (а) та його схеми заміщення (б, в) на комутаційних інтервалах

На першому інтервалі під час включеного транзистора VT (рис. 6.1 б) джерело постійної напруги U_d підключене до навантаження через накопичувальний дросель L . Під час цього енергія відбирається від джерела та запасється у дроселі L та в конденсаторі C і витрачається в опорі навантаження R .

У разі вимкненого транзистора VT на другому інтервалі (рис. 6.1 в) струм дроселя L через діод VD і струм конденсатора C протікають на вихід перетворювача через навантаження R .

Завдання 6.1 Віртуальна лабораторна установка та її характеристики

Віртуальна лабораторна установка для досліджень імпульсного знижувального регулятора постійної напруги показана на рис. 6.2

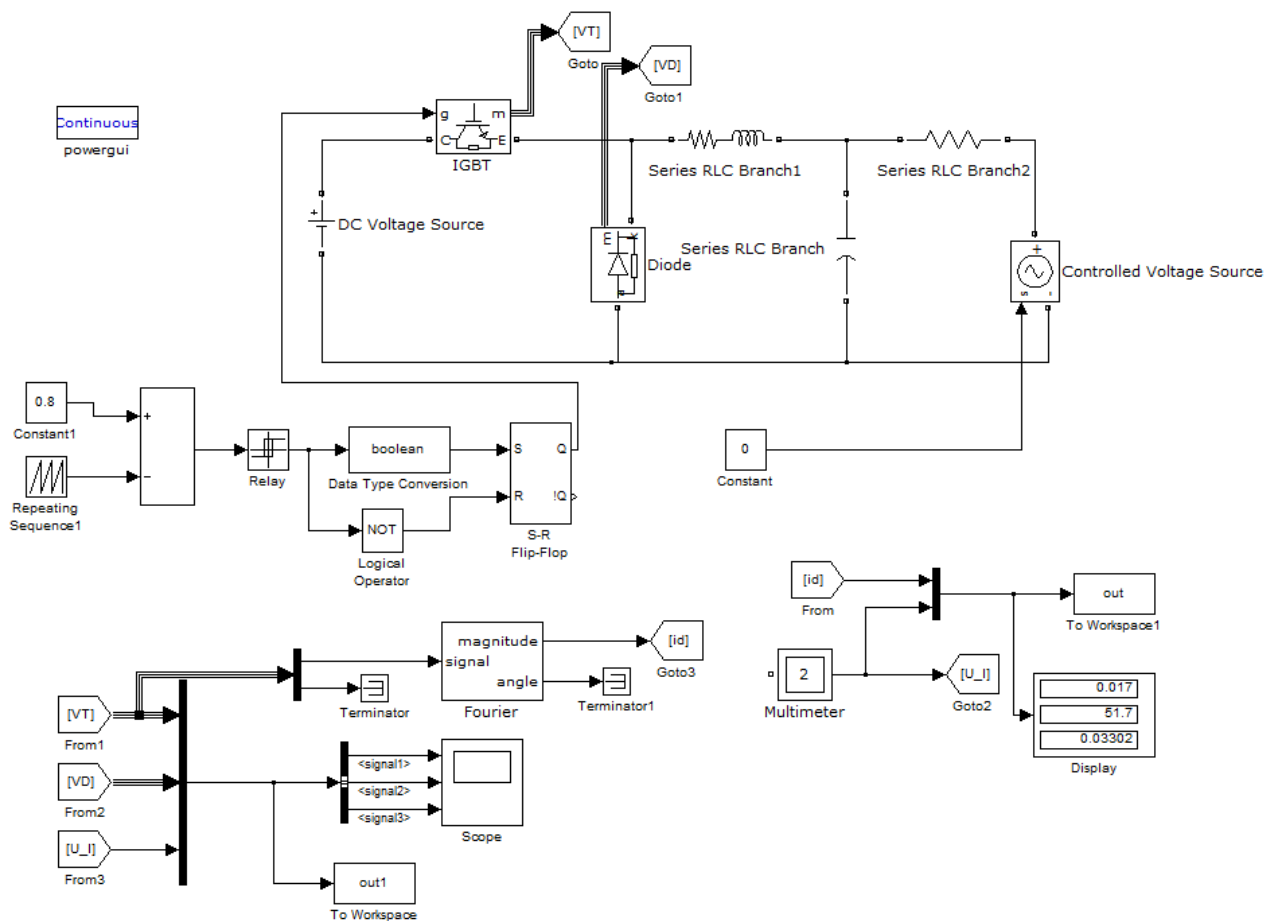


Рисунок 6.2 - Модель імпульсного знижувального регулятора постійної напруги

Розробка моделі регулятора з незалежним управлінням здійснювалася під час використання структурно-функціональних (пакет Simulink) і віртуальних (пакет розширення Sim Power System) моделей. Представлення результатів моделювання реалізується програмним та інструментальними засобами середовища MATLAB Simulink.

Модель імпульсного знижувального регулятора містить силову, керуючу і вимірювальну частини. Кожен блок моделі має вікно налаштування основних параметрів. Бібліотеки та піктограми блоків, їх призначення в моделі, а також

параметри блоків, складових моделі, наведені в табл. 5.1. Час моделювання (Stop time) – 0,7 с, крок дискретизації при моделюванні (Max Step Size) - 10-5.

Таблиця 6.1- Бібліотеки, назви, піктограми і параметри блоків:

Бібліотека	Блок	Параметри
SimPowerSystems\ Power Electronics	Diode	Resistance Ron (Ом) — 0,1, Inductance Lon (Гн) — 0, Forward voltage Vf (В) — 1, Initial current Ic (А) — 0, Snubber resistance Rs(Ом)-1e5, Snubber capacitance Cs-inf
SimPowerSystems\ Power Electronics	IGBT	Resistance Ron (Ом) — 0,1, Inductance Lon (Гн) — 0, Forward voltage Vf (В) — 1, Current 10% nail time Tf(c)-1e-6, Current nail time Tf(c)-2e-6, Initial current Ic (А) — 0, Snubber resistance Rs(Ом) — 1e5, Snubber capacitance Cs-inf
SimPowerSystems\ Elements	Series RLC Branch	Branch type — R L, Resistance (Ом) — 0,3+Ne-2 Inductance (Гн) — (1+N)e3, Measurements — Branch current
SimPowerSystems\ Electrical Sources	DC Voltage source	Amplitude (В) — 150+N, Measurements — None
SimPowerSystems\ Elements	Series RLC Branch	C-Branch type — C, Capacitance C(Ф) — 1e-4, Measurements — Branch voltage. R-Branch type — R, Resistance (Ом) — 10, Measurements — Branch current
SimPowerSystems\ Electrical Sources	Controlled Voltage source	Source type — DC, Initial amplitude — 0, Measurements — None
Simulink\ Sources	Constant	0
Simulink\ Measurement	Multimeter	Available Measurements — Ub: C, Ib: R. Selected Measurements — Ub: C, Ib: R.
Sim Power Systems \ Extras Library\ Measurement	Fourier	Fundamental frequency f(Гц) — 2000, Harmonic n — 0.
Simulink\	To Workspace	Variable name — out, Limit data

Sinks		points to last — 5000, Decimation — 10, Sample time — 1e-5, Save format — Array. Variable name — out1, Limit data points to last — 20, Decimation — 1, Sample time— 1e-5, Save format — Array.
Simulink\ Signal Routing	Goto, From	—
Simulink\ Sinks	Display	—
Simulink\ Signal Routing	Mux	—
Simulink\ Signal Routing	Bus Selector	Number of inputs 3.
Simulink\ Sinks	Scope	Scope parameters: General- Number of axes-3, Time range-0.002, Sample time-1e-5. Data history: Variable name — out1. Format — structure with time.
Simulink\ Source	Repeating sequence	Time values — [0; 0,0001], Output values — [0; 1].
Simulink\ Math Operation	Summ	+ -
Simulink\ Discontinuous	Relay	Switch on point — 0,01; Switch off point— -0,01; Output when on — 1; Output when off — 0.
Simulink\ Logic and Bit Operation	Data type conversion	Output data type mode — boolean
Simulink\ Logic and Bit Operation	Logical operator	Operator — NOT
Simulink/Simulink Extras/Flip Flops	S-R Flip-Flop	Initial condition (state of Q) — 0.
Час моделювання		0,7 с
Вирішувач		ode45

Миттєві значення струму і напруги на транзисторі та діоді, напруги і струму навантаження можна спостерігати на екрані осцилоскопа (рис. 6.2).

Ці ж значення у відносних одиницях, а також миттєві відносні потужності втрат у транзисторі та діоді будуються після проведення моделювання при виконанні програми, представленої в лістингу 5.

Лістинг 5:

```
Ub=150; r=0.4;
Ib=Ub/r;
t=0:1e-5:19e-5;
IVT1=out1(:,1);
IVT=IVT1/Ib;
UVT1=out1(:,2);
UVT=UVT1/Ub;
IVD1=out1(:,3);
IVD=IVD1/Ib;
UVD1=out1(:,4);
UVD=UVD1/Ub;
U1=out1(:,5);
U=U1./Ub;
I1=out1(:,6);
I=I1./Ib;
PVD=UVD.*IVD;
PVT=UVT.*IVT;
subplot(3,1,1);
plot(t,IVT,t,IVD);
grid on;
ylabel('IVT(p.u) IVD(p.u)');
legend('IVT', 'IVD','Location','Best');
subplot(3,1,2);
plot(t,UVT,t,UVD);
ylabel('UVT(p.u) UVD(p.u)');
legend('UVT','UVD','Location','Best');
```

```

grid on;
subplot(3,1,3);
plot(t,PVT,t,PVD);
grid on;
xlabel('time');
ylabel('PVT(p.u) PVD(p.u)');
legend('PVT','PVD','Location','Best');

```

На рис. 6.3 показані графіки електромагнітних процесів у відносних величинах для $E = 0$ В і $\gamma = 0,8$ * (* У всіх розрахунках базові значення змінних рівні: $U_b = U_d = 150$ В; $I_b = U_b / r = 375$ А. Відносні значення змінних обчислюються шляхом ділення абсолютних значень цих змінних на базові значення.).

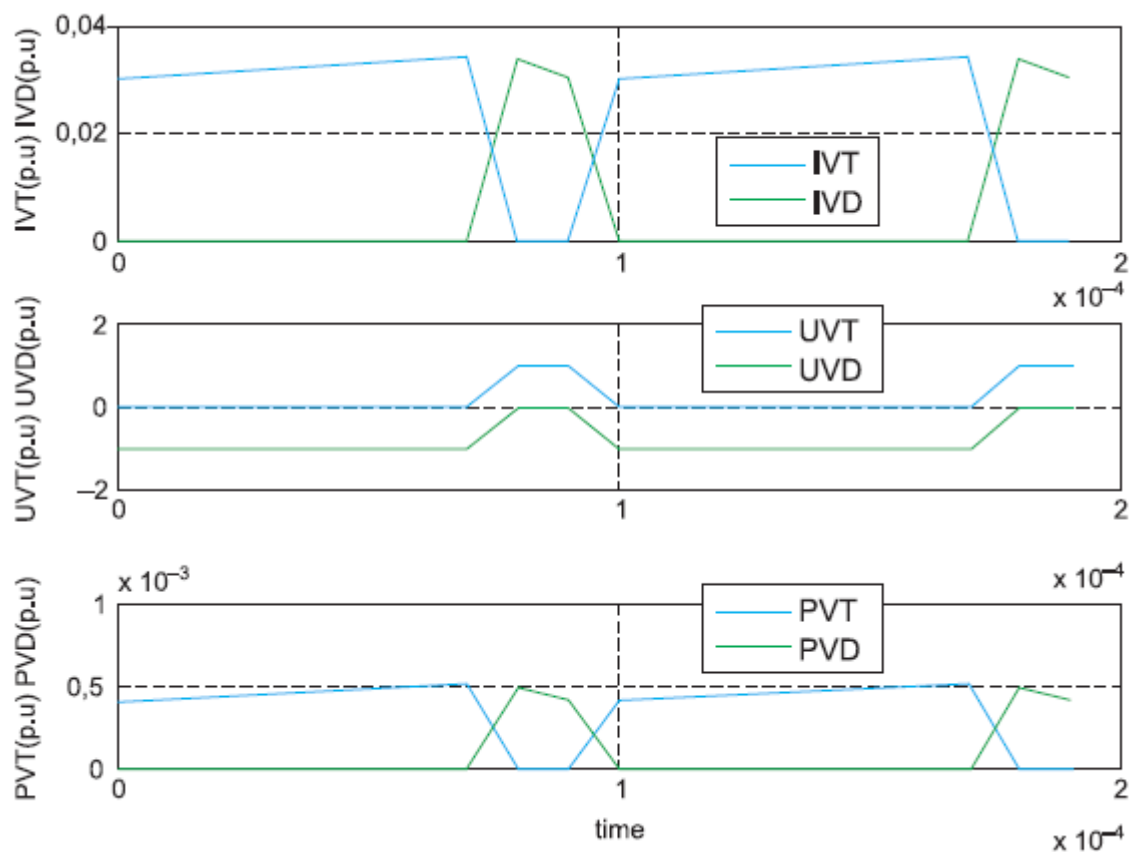


Рисунок 6.3- Графіки електромагнітних процесів

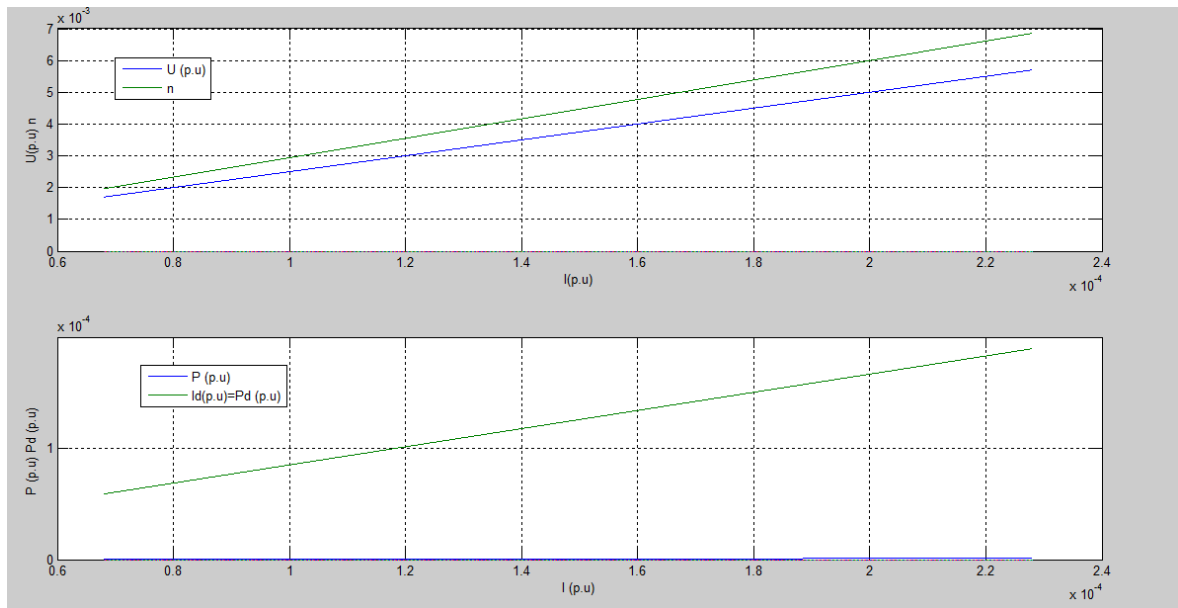


Рисунок 6.4 - Електромагнітні та енергетичні характеристики регулятора

Електромагнітні та енергетичні характеристики регулятора можна побудувати за допомогою програми наведеної у лістингу 6:

Лістинг 6:

```

Ub=150; r=0.4; Ib=Ub/r;%Параметри регулятора
Id1=out(:,1);
Id=Id1./Ib;
U1=out(:,2);
U=U1./Ub;
I1=out(:,3);
I=I1./Ib;
P=U.*I;
Pd=Id.*1;
n=P./Pd;
subplot(2,1,1);
plot(I,U,I,n,I,0);
grid on;
xlabel('I (p.u)');
ylabel('U (p.u) n');
legend('U (p.u)', 'n', 'Location', 'Best');
subplot(2,1,2);
plot(I,P,I,Pd,I,0);
grid on;
xlabel('I (p.u)');
ylabel('P (p.u) Pd (p.u)');
legend('P (p.u)', 'Id(p.u)=Pd (p.u)', 'Location', 'Best');

```

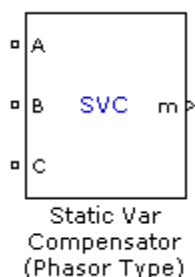
Контрольні питання та завдання

1. Основні галузі застосування знижувального регулятора постійної напруги.
2. Описати та охарактеризувати принцип дії розрахункової схеми знижувального регулятора.
3. Описати принцип дії та розкрити призначення кожного елемента системи керування.
4. Описати принцип дії та розкрити призначення кожного елемента силовій частини моделі системи.
5. Описати принцип дії та розкрити призначення кожного елемента вимірювальної частини моделі системи.

ТЕМА 5: КОМПЕНСАТОРИ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ КОМП'ЮТЕРНИЙ ПРАКТИКУМ № 7 «ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ СТАТИЧНОГО КОМПЕНСАТОРА РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ STATIC VAR COMPENSATOR»

Мета роботи: познайомитися з режимами роботи статичних компенсаторів реактивної потужності. Побудувати модель та провести моделювання заданої схеми зі статичним компенсатором. Побудувати та дослідити основні характеристики системи.

Основні теоретичні відомості



Блок Static Var Compensator призначений для моделювання трифазного статичного компенсатора реактивної потужності. Схема моделі компенсатора зображена на рис. 7.1.

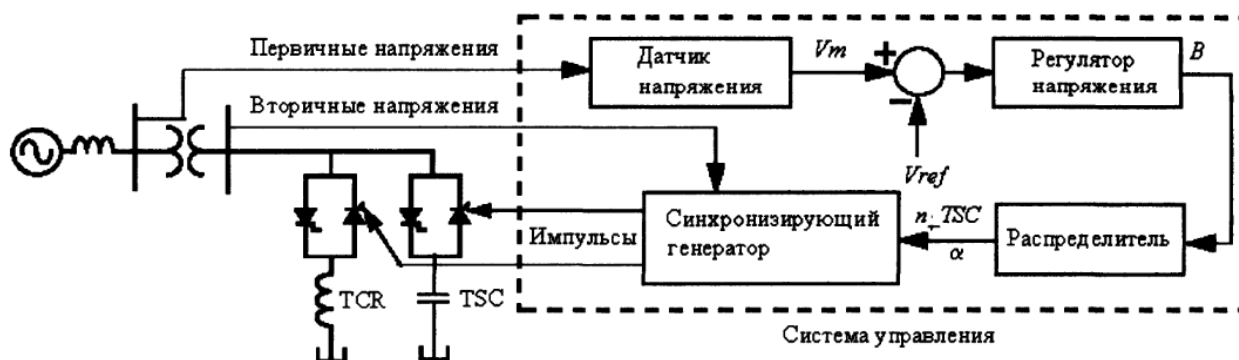


Рисунок 7.1- Схема моделі статичного компесатора

До складу системи керування належать:

- датчик напруги, який вимірює напругу прямої послідовності, яким необхідно управляти;

- стабілізатор напруги, який використовує похибку за напругою (різницю між виміряною та опорною напругами) для визначення реактивної провідності В системи TSC, необхідної для підтримання сталого значення лінійної напруги;
- розподілювач, який визначає, на яку групу тиристорів повинні надходити імпульси управління, а також кут управління тиристорами;
- синхронізуючий генератор, який генерує імпульси управління тиристорами.

Даний блок використовується для розрахунку схем векторним методом. Вибір векторного методу розрахунку здійснюється за допомогою блока `powergui`. Модель статичного компенсатора може бути використана для розрахунку трифазних енергетичних систем, що містять синхронні генератори, двигуни та динамічні навантаження, для визначення динамічної стійкості та впливу статичного компенсатора на електромеханічні коливання в системі, а також на ємність лінії передачі. Такий блок містить спрощені моделі його складових систем, які представлені доволі простими передаточними функціями та елементами затримки, що дають правильний результат на основній частоті мережі.

Статичний компенсатор реактивної потужності може працювати у двох режимах:

- регулювання напруги;
- режим управління реактивною потужністю.

Вольт-амперна характеристика компенсатора в режимі регулювання напруги наведена на рис. 7.2.



Рисунок 7.2 - Вольт-амперна характеристика компенсатора реактивної потужності

Поки реактивна провідність компенсатора B не виходить за межі $B_{c\max}$ та $B_{l\max}$, що визначаються величинами реактивних потужностей конденсаторів та реакторів, значення напруги визначене значенням опорної напруги. Під час цього, зазвичай, спостерігається спад напруги, як показано на рис. 7.2.

Вольт-амперна характеристика компенсатора в даному режимі описана трьома рівняннями:

$$\begin{aligned}
 V &= V_{ref} + V_s * I - \text{режим регулювання}; \\
 V &= \frac{I}{B_{c\max}} - \text{режим генерації максимальної ємнісної потужності}; \\
 V &= \frac{I}{B_{l\max}} - \text{режим генерації максимальної індуктивної потужності}.
 \end{aligned}
 \tag{7.1}$$

де V – напруга прямої послідовності (в. о.); I – реактивний струм (в. о. / P_{base}).
 Значення $I > 0$ вказує на індуктивний характер струму; X_s – реактивний опір на ділянці спаду (в. о./ P_{base}); $B_{l\max}$ – максимальна індуктивна провідність (в. о. / P_{base}); P_{base} – базисна потужність (сумарна для трьох фаз).

Коли компенсатор працює в режимі стабілізації напруги, швидкість реакції на зміни напруги в системі залежить від параметрів регулятора напруги, реактивного опору X та стійкості енергосистеми. Для інтегруючого регулятора напруги ($K_p=0$), якщо постійною складовою часу T системи вимірювання та величиною затримки системи тиристорів можна знехтувати, то

замкнута система регулювання, що складається з компенсатора реактивної потужності та енергосистеми, може бути апроксимована системою першого порядку з величиною константи часу замкнутого контуру, що дорівнює:

$$T_c = \frac{1}{K_i * (X_s + X_n)}; \quad (7.2)$$

де T_c – константа часу замкнутого контура; K_p – коефіцієнт підсилення пропорційної частини регулятора напруги; K_i – коефіцієнт підсилення інтегруючої частини регулятора напруги; X_s – реактивний опір на ділянці спаду; X_n – еквівалентний реактивний опір енергосистеми.

Завдання для проведення роботи

Побудувати модель та дослідити вольт-амперні характеристики компенсатора реактивної потужності.

Завдання 7.1 Вихідні дані для моделювання (див. табл. 7.1):

- напруга живлення $U = 200$ кВ;
- частота змінного струму $f = 50$ Гц;
- потужність системи $S = 3000$ МВА;
- потужність батареї конденсатора статичного компенсатора 300;
- потужність реактора 200.

Побудова моделі:

Таблиця 7.1-Блоки та параметри моделі у середовищі MATLAB/Simulink:

Бібліотека	Блок	Параметри
SimPowerSystems/Electrical Source	Three-Phase Programmable Voltage Source	Peak amplitude: $(500+4 \cdot N)e^3$, Phase: 0, Frequency: 50 (Гц).
SimPowerSystems/Elements	Three-Phase Series RLC Branch	Branch type: RL $R = (500+4 \cdot N)e^3 / 3000e6 / 10$ $L =$ $(500+4 \cdot N)e^3 / 3000e6 / (2 \cdot \pi \cdot 50)$
SimPowerSystems/Elements	Three-Phase	Nominal phase-to-phase voltage:

	Series RLC Load	$(500+4 \cdot N)e3$
SimPowerSystems/ Measurement	Three-Phase V-I Measurement	Base voltage: $(500+4 \cdot N)e3$
SimPowerSystems/ Application libraries/ FACTS library/ Power-Electronics based FACTS	Static Var Compensator (Phasor Type)	Display: Control Parameters Mode of operation: Voltage regulation $V_{ref}=1.0$ Droop $X_s=0.03$ Voltage regulator [0 300]
Simulink/Signal Routing	Bus Selector	Згідно з рис. 6.
Simulink/Signal Routing	Mux	–
Simulink/Math Operations	Gain	Gain: 2 Sample time: -1
Simulink/Signal Routing	From	Goto Tag: B1; Icon Display: Tag; Goto Tag: V1; Icon Display: Tag
SimPowerSystems/Elements	Ground	–
Simulink/Sinks	Scope	Number of axes: 2 Data history: Limit data points to last – вимкнути опцію
SimPowerSystems	Powergui	Configure parameters: Simulation type: Phasor 50 Hz
Час моделювання		1,0 с
Вирішувач		Ode23tb

Настроювання блока Three-Phase Programmable Voltage Source проводиться згідно з таблицею варіантів та рис.7.3.

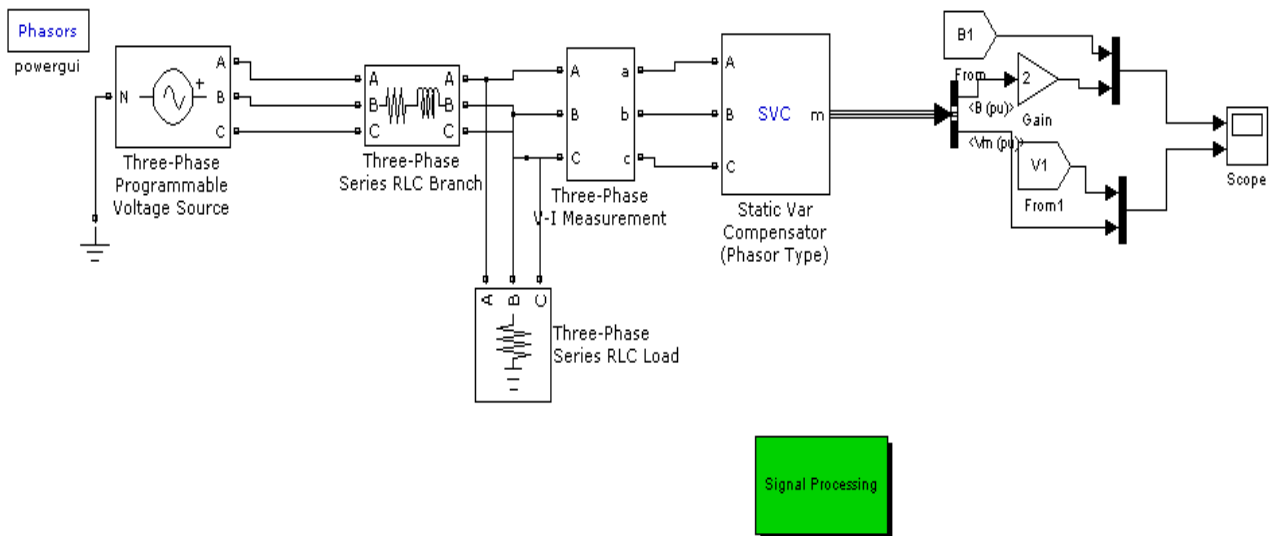


Рисунок 7.3 - Схема мережі зі статичним компенсатором реактивної потужності

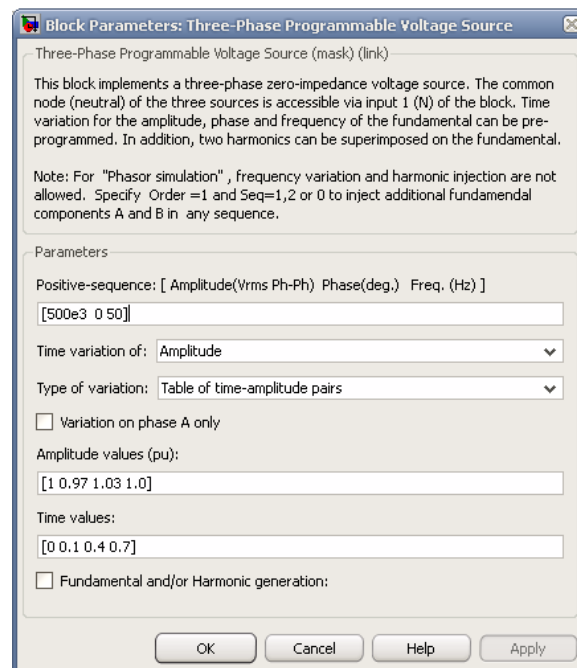


Рисунок 7.4- Вікно настроювання блока Three-Phase Programmable Voltage Source

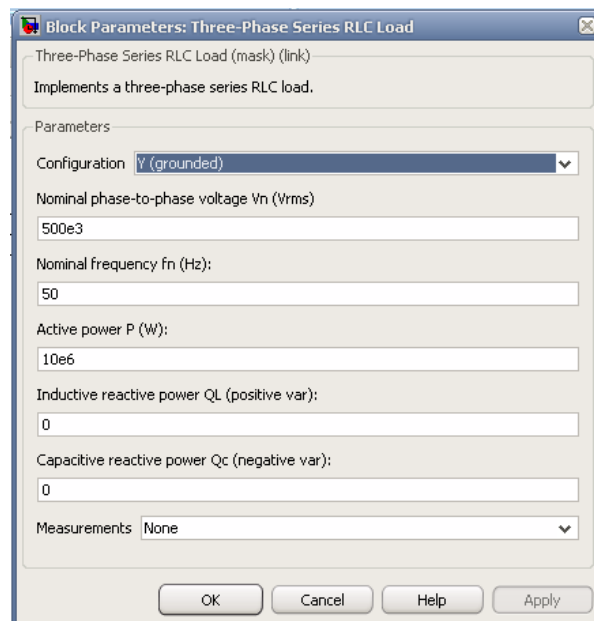


Рисунок 7.5 - Вікно блоку Three-Phase Series RLC Load

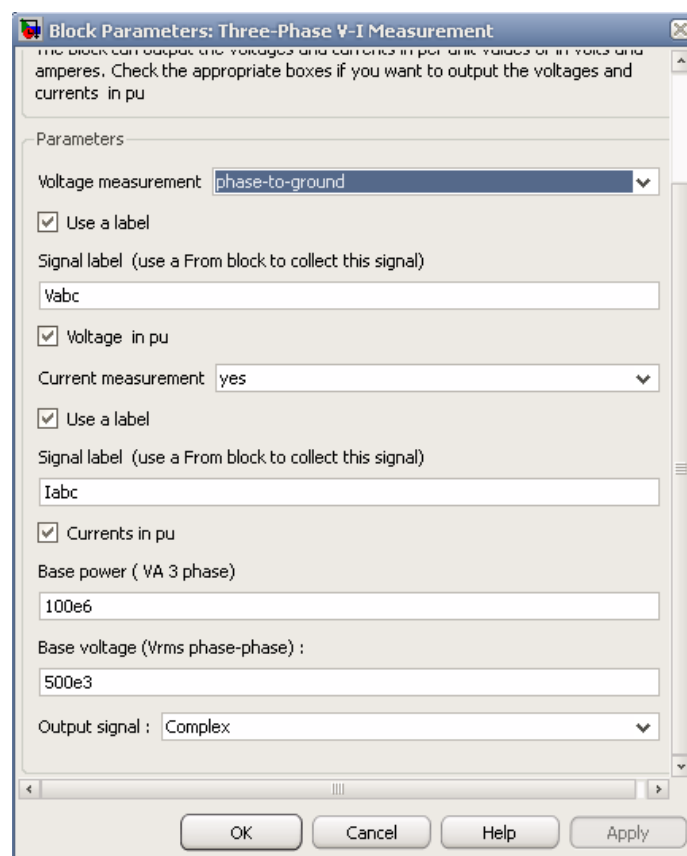


Рисунок 7.6- Вікно блоку Three-Phase V-I Measurement

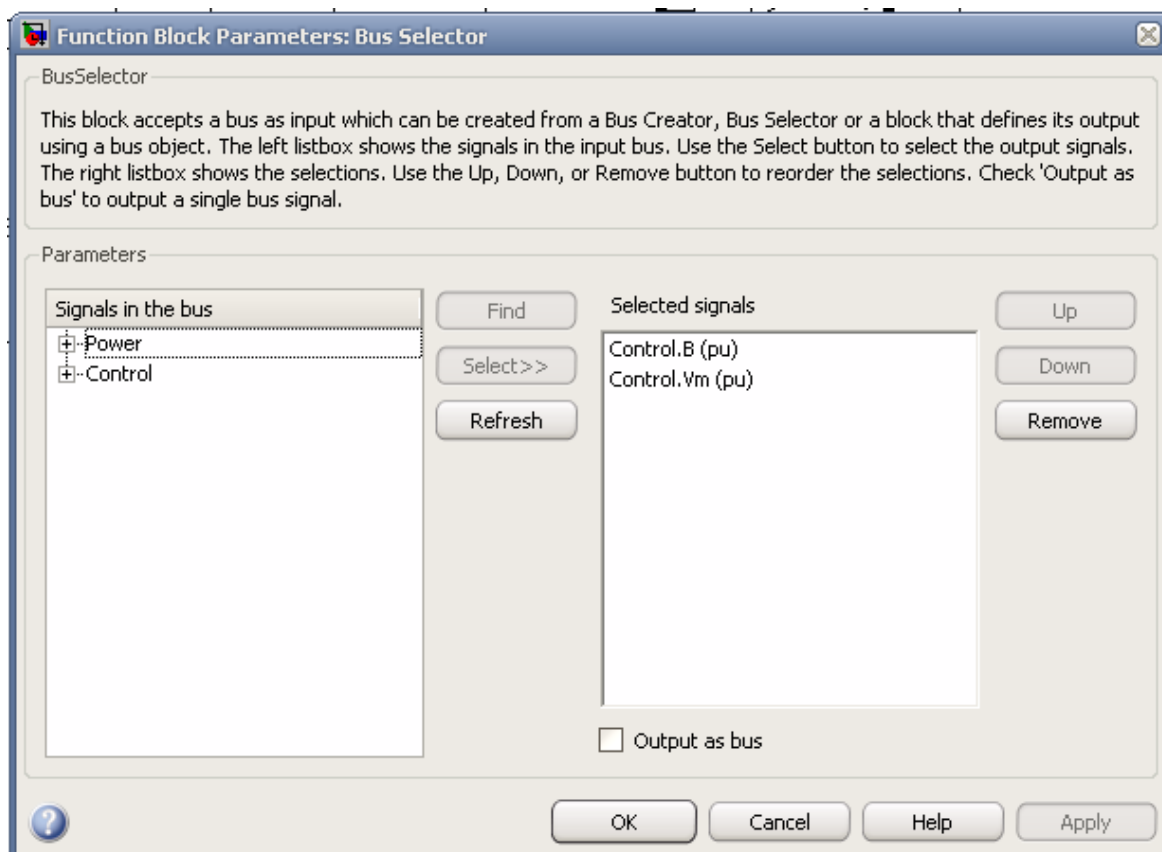


Рисунок 7.7 - Вікно налаштування блоку Bus Selector

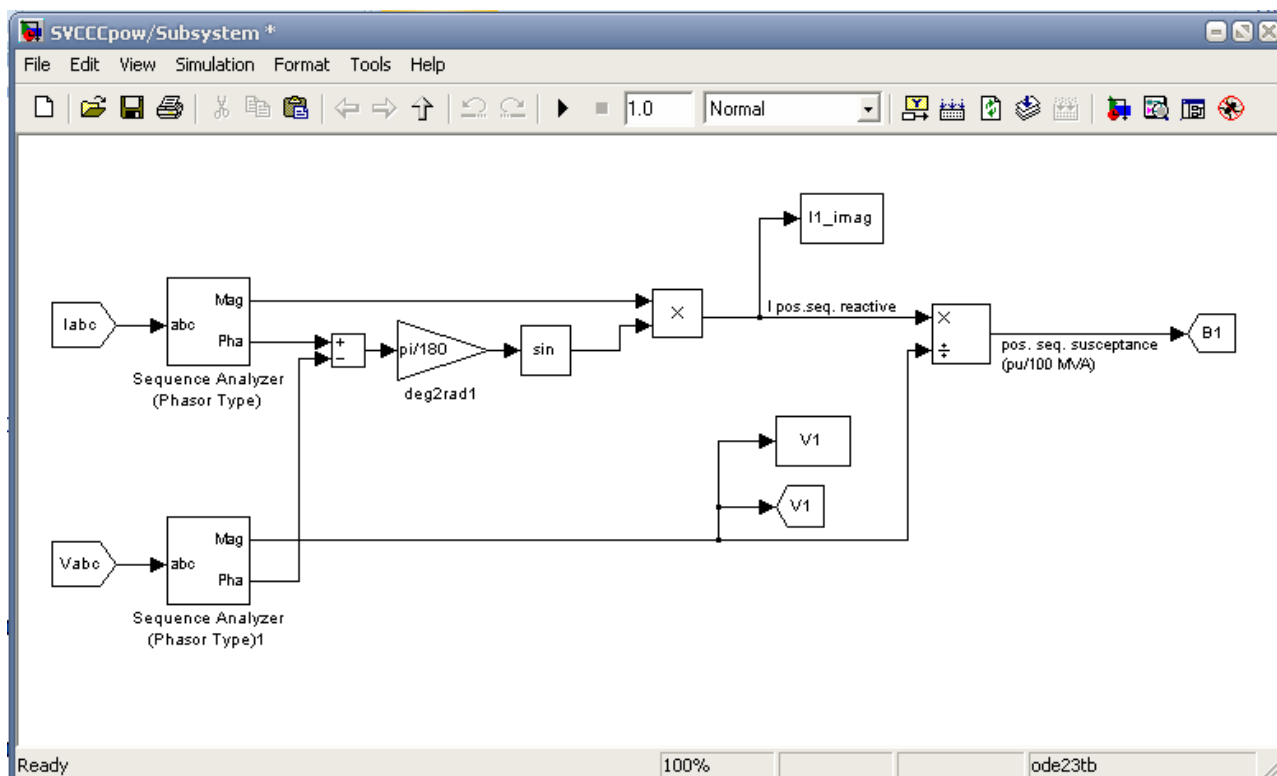


Рисунок 7.8 - Вікно моделі підсистеми для обробки сигналу на компенсаторі

Для побудови підсистеми обробки сигналів необхідно скористатись таблицею завдань:

Таблиця 7.2- Таблиця завдань

Бібліотека	Блок	Параметри
Simulink/Signal Routing	From	Відповідно до Рис. 8
Simulink/ Math operations	Sum	Icon shape: regulator List of signs:+- Sample time:-1
Simulink/ Math operations	Gain	Gain: $\pi/180$ Sample time:-1
Simulink/Math operations	Trigonometric function	Function: sin
Simulink/Math operations	Product	Number of inputs: ** Multiplication: Element-wise(.*) Sample time:-1
Simulink/Sincs	To workspace	Variable name: I1_imag; Limit Data points to last: inf; Decimation:1 Sample time:-1
Simulink/Math operations	Product	Number of inputs: */ Multiplication: Element-wise(.*) Sample time:-1
Simulink/Signal routing	Goto	Goto tag: B1; Tag visibility: Global
Simulink/Sincs	To workspace	Variable name: V1; Limit Data points to last: inf;

		Decimation:1 Sample time:-1
Simulink/Signal routing	Goto	Goto tag: V1; Tag visibility: Global
Simpowersystems/Extra library/Phasor Library	Sequence Analyzer (Phasor Type)	—

У ході роботи зняти та дослідити фактичні значення реактивної провідності прямої послідовності В1 та сигнал управління реактивною провідністю регулятора напруги (рис. 1.8).

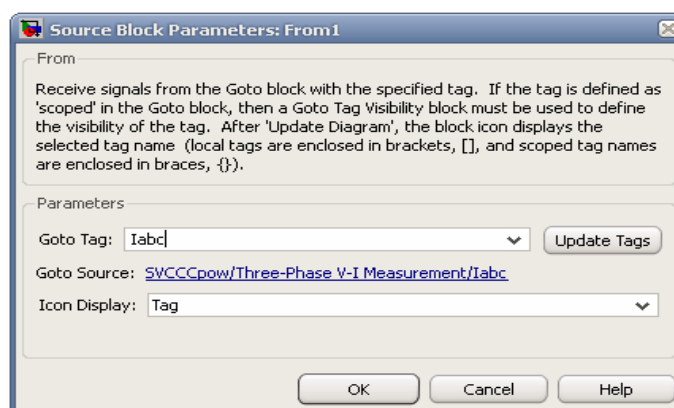


Рисунок 7.9 - Вікно прикладу настроювання блоку From

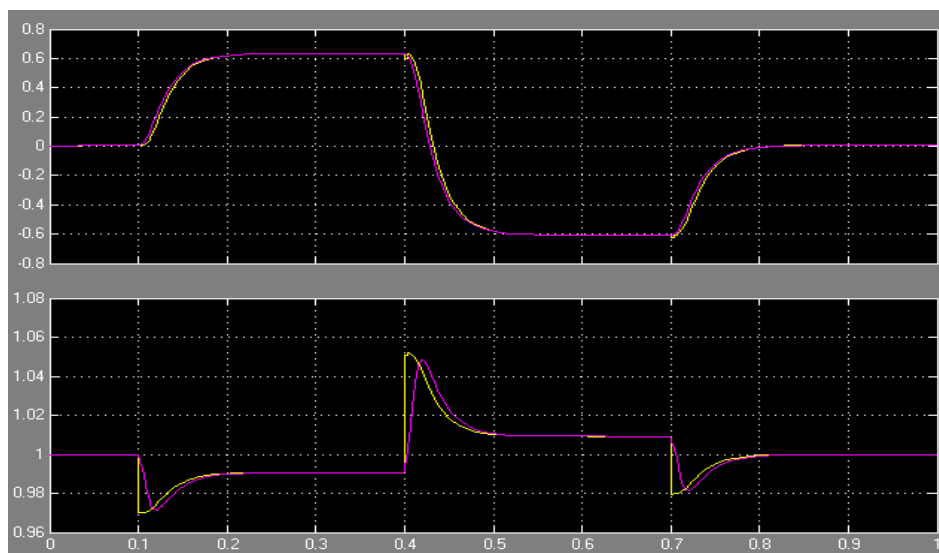


Рисунок 7.10 - Характеристики системи в стійкому режимі
Зняти характеристики системи, коли вона нестійка (при S=600 МВА).

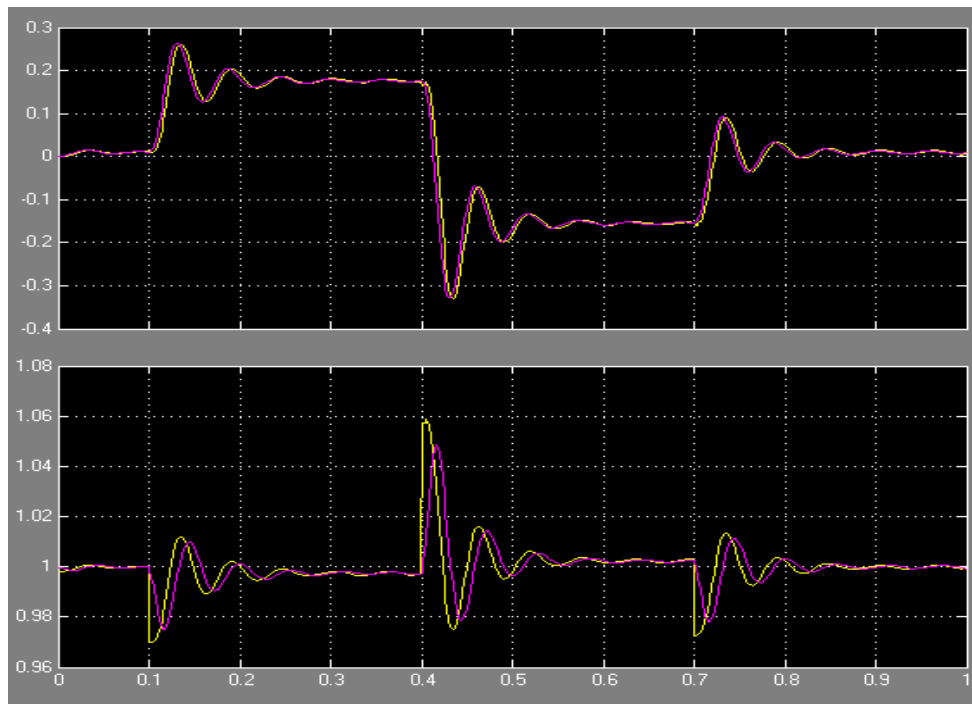


Рисунок 7. - Характеристики системи в режимі порушення стійкості

Контрольні питання та завдання

1. Структурна схема та складові елементи системи управління.
2. Призначення датчика напруги.
3. Призначення стабілізатора напруги.
4. Призначення розподільовача.
5. Призначення синхронізуючого генератора.
6. Навести вольт-амперну характеристику компенсатора в режимі регулювання напруги.
7. Режими роботи статичного компенсатора.